



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

USTÁLENÝ CHOD A ZKRATOVÉ POMĚRY V SÍTI 110 KV E.ON PŘI MŮSTKOVÉM PROVOZU TRANSFORMÁTORŮ T402 A T403 V TRANSFORMOVNĚ 400/110 KV SOKOLNICE

STEADY STATE AND SHORT-CIRCUIT CONDITIONS WITHIN E.ON 110kV POWER NETWORK AT BRIDGE
OPERATION OF TRANSFORMERS T402 AND T403 IN 400/100 kV TRANSFORMER STATION SOKOLNICE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

BC. JAN BERNÁT

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

DOC. ING. VLADIMÍR BLAŽEK, CSC.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektroenergetika

Student: Bc. Jan Bernát

ID: 125367

Ročník: 2

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

**Ustálený chod a zkratové poměry v síti 110 kV E.ON při můstkovém provozu
transformátorů T402 a T403
v transformovně 400/110 kV Sokolnice**

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Úvod
2. Výpočet ustáleného chodu sítě 110 kV
3. Výpočet zkratových poměrů v síti 110 kV
4. Výpočet ustáleného chodu a zkratových poměrů v síti 110 kV napájené z rozvodny 110 kV Sokolnice
5. Vyhodnocení výpočtu ustáleného chodu a zkratových poměrů v síti 110 kV napájené z rozvodny 110 kV Sokolnice
6. Závěr
7. Literatura

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 23.5.2014

Vedoucí práce: doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

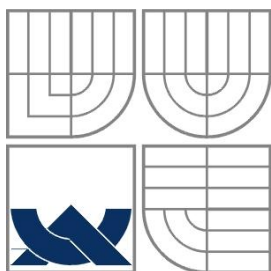
Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

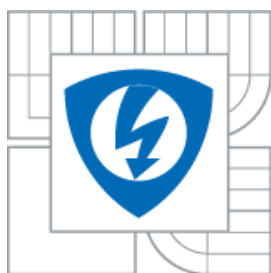
BERNÁT, J. *Ustálený chod a zkratové poměry v síti 110 kV E.ON při můstkovém provozu transformátorů T402 a T403 v transformovně 400/110 kV Sokolnice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 91 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc..

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

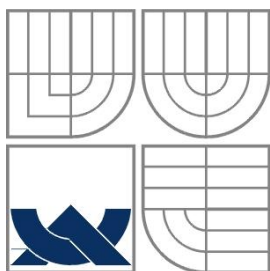
**Ustálený chod a zkratové poměry v síti
110 kV E.ON při můstkovém provozu
transformátorů T402 a T403
v transformovně 400/110 kV Sokolnice**

Bc. Jan Bernát

vedoucí: doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2014

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Faculty of Electrical Engineering and Communication

Department of Electrical Power Engineering

Master's Thesis

**Steady state and short-circuit conditions
within E.ON 110kV power network at
bridge operation of transformers T402 and
T403 in 400/100 kV
transformer station Sokolnice**

by

Bc. Jan Bernát

Supervisor: doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

Brno University of Technology, 2014

Brno

ABSTRAKT

Diplomový práce se zabývá výpočtem ustáleného chodu a zkratových poměrů v síti 110 kV při můstkovém provozu transformátorů v rozvodně Sokolnice.

Teoretická část práce se věnuje výpočtu ustáleného chodu sítí pomocí Newtonovy iterační metody, zkoumá zkraty – jejich časový průběh, charakteristické hodnoty a způsob jejich výpočtu.

V praktické části práce je popsána síť 110 kV napájená z rozvodny Sokolnice. Hlavním cílem práce je porovnání dvou základních zapojení: můstkového chodu transformátorů T202 a T203 (současný provoz) a můstkového chodu T402 a T403 (provoz po roce 2017). Tato dvě zapojení byla kontrolována i na jeden mimořádný stav, kdy rozvodnu Sokolnice postihne výpadek jedné přípojnice. Kontrolovány byly napěťové poměry, zatížení vedení a transformátorů, a celková výkonová bilance. Dále byly vypočítány zkratové poměry a proběhla kontrola zkratových odolností jednotlivých rozveden. Na závěr jsou navržena technická opatření nutná k zajištění bezproblémového můstkového provozu transformátorů T402 a T403.

KLÍČOVÁ SLOVA: Elektrizací soustava, distribuční soustava, můstkový provoz, Newtonova iterační metoda, rozvodna Sokolnice, ustálený chod, zkrat.

ABSTRACT

The master's thesis deals with a calculation of steady state and short-circuit conditions in a 110 kV system during a bridge operation of transformers in a Sokolnice substation.

The theoretical part of the thesis deals with a calculation of steady state of a system using Newton's iterative method, it investigates short-circuits – their timing, distinctive values and a method of their calculation.

In the practical part the 100 kV grid supplied from Sokolnice substation is described. The main goal of the thesis is a comparison of two basic wirings: bridge operation of T202 and T203 transformers (contemporarily in service) and bridge operation of T402 and T403 (in service after 2017). These two wirings were controlled even during one state of emergency during which the Sokolnice substation will be affected by an outage of one busbar. Voltage conditions, loading of power line and transformers and overall power balance were controlled. Short-circuit conditions were also calculated and short-circuit resistance of particular substations was inspected. In the conclusion technical measures needed to ensure smooth bridge operation of convertors T402 and T403.

KEY WORDS:

Electricity system, distribution network, bridge operation, Newton's iterative method, Sokolnice substation, steady state, short-circuit.

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	13
1 ÚVOD.....	17
1.1 CÍLE PRÁCE	17
2 USTÁLENÝ CHOD SÍTÍ ZVN A VVN	18
2.1 KLASIFIKACE UZLŮ A PODMÍNKY URČITOSTI CHODU SÍTĚ.....	19
2.2 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU JAKO LINEÁRNÍ ÚLOHA	20
2.2.1 ELIMINACE BILANČNÍHO UZLU	21
2.3 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU JAKO NELINEÁRNÍ ÚLOHA.....	22
2.3.1 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU GAUSS-SEIDLOVOU METODOU	24
2.3.2 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU NEWTONOVOU ITERAČNÍ METODOU	24
2.3.3 ALGORITMUS VÝPOČTU NEWTONOVI ITERAČNÍ METODY A ZJEDNODUŠENÝ VÝPOČET.....	28
3 PŘECHODNÉ JEVY V ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ.....	31
3.1 ZKRATY	32
3.1.1 PŘÍČINY VZNIKU ZKRATU	32
3.1.2 NEBEZPEČNÉ DĚJE PŘI ZKRATU	33
3.1.3 ROZDĚLENÍ ZKRATŮ	33
3.2 ČASOVÝ PRŮBĚH ZKRATOVÉHO PROUDU.....	34
3.3 ZKRAT ELEKTRICKY BLÍZKÝ A VZDÁLENÝ	38
3.4 CHARAKTERISTICKÉ HODNOTY ZKRATOVÉHO PROUDU.....	39
4 VÝPOČET ZKRATŮ	41
4.1 POSTUP VÝPOČTU.....	41
4.2 METODA EKVIVALENTNÍHO NAPĚŤOVÉHO ZDROJE	41
4.2.1 VÝPOČET VE SKUTEČNÝCH HODNOTÁCH	42
4.2.2 VÝPOČET V POMĚRNÝCH HODNOTÁCH	42
4.2.3 ZJEDNODUŠUJÍCÍ PŘEDPOKLADY	43
4.2.4 VÝPOČET MAXIMÁLNÍHO ZKRATOVÉHO PROUDU	44
4.2.5 VÝPOČET MINIMÁLNÍHO ZKRATOVÉHO PROUDU.....	44
4.3 VÝPOČET ZKRATOVÝCH IMPEDANCÍ PRVKŮ SOUSTAVY.....	45
4.3.1 SÍŤOVÉ NAPÁJEČE	45
4.3.2 VENKOVNÍ VEDENÍ A KABELY	46
4.3.3 TRANSFORMÁTORY.....	47
4.3.4 SYNCHRONNÍ GENERÁTORY	50
4.4 ZKRAT V SOUSTAVĚ SOUMĚRNÝCH SLOŽEK.....	51
4.4.1 VÝPOČET TROJFÁZOVÉHO ZKRATU	53
4.4.2 VÝPOČET JEDNOFÁZOVÉHO ZKRATU	54

5 DISTRIBUČNÍ SOUSTAVA E.ON VÝCHOD - OBLAST SOKOLNICE.....	56
5.1 POPIS DISTRIBUČNÍ OBLASTI E.ON VÝCHOD	56
5.2 UZLOVÁ OBLAST SOKOLNICE	57
6 MŮSTKOVÝ PROVOZ TRANSFORMÁTORŮ T202 A T203	61
6.1 MŮSTKOVÉ ZAPOJENÍ.....	61
6.2 USTÁLENÝ CHOD	61
6.3 ZKRATOVÉ POMĚRY	65
6.4 VÝPADEK PŘÍPOJNICE C.....	66
7 MŮSTKOVÝ PROVOZ TRANSFORMÁTORŮ T402 A T403	70
7.1 USTÁLENÝ CHOD	70
7.2 ZKRATOVÉ POMĚRY	73
7.3 VÝPADEK PŘÍPOJNICE C.....	74
8 POROVNÁNÍ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	78
8.1 VYHODNOCENÍ MŮSTKOVÉHO ZAPOJENÍ T202 A T203 SE ZAPOJENÍM S T402 A T403.....	78
8.1.1 USTÁLENÝ CHOD	78
8.1.2 ZKRATOVÉ POMĚRY	80
8.2 VYHODNOCENÍ MŮSTKOVÉHO PROVOZU T202 A T203 S MIMOŘÁDNÝM STAVEM.....	82
8.3 VYHODNOCENÍ MŮSTKOVÉHO PROVOZU T402 A T403 S MIMOŘÁDNÝM STAVEM.....	85
9 NÁVRH PROVOZNÍCH A TECHNICKÝCH OPATŘENÍ	88
10 ZÁVĚR.....	89
POUŽITÁ LITERATURA	91

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2-1: Náhradní schéma sítě	20
Obr. 2-2: Fázorový diagram induktivní dodávky do uzlu	22
Obr. 2-3: Náhrada prvku π -článkem.....	24
Obr. 2-4: Jednoduchý přenos s podélnou reaktancí	29
Obr. 2-5: Fázorový diagram změny činného odebíraného výkonu	30
Obr. 2-6: Fázorový diagram změny jalového odebíraného výkonu	30
Obr. 3-1: Souměrné zkraty	34
Obr. 3-2: Nesouměrné zkraty	34
Obr. 3-3: Průběh souměrného zkratového proudu [1].....	36
Obr. 3-4: Průběh zkratového proudu s maximální stejnosměrnou složkou [1].....	37
Obr. 3-5: Elektricky vzdálený zkrat [5].....	38
Obr. 3-6: Elektricky blízký zkrat [5]	38
Obr. 4-1: Trojvinutový transformátor [6]	48
Obr. 4-2: Fázorový diagram generátoru v chodu se jmenovitými parametry	50
Obr. 4-3: Rozložení nesymetrických fázorů na symetrické složky [3]	51
Obr. 4-4: Trojfázový zkrat.....	53
Obr. 4-5: Jednofázový zkrat	54
Obr. 5-1: Vedení přenosové soustavy v okolí Sokolnic [9]	57
Obr. 5-2: Zjednodušené schéma UO Sokolnice	58
Obr. 6-1: Schéma můstkového provozu T202 a T203 v R 110 kV Sokolnice.....	62
Obr. 6-2: Schéma UO Sokolnice při výpadku přípojnice C s T202.....	66
Obr. 7-1: Schéma můstkového provozu T402 a T403 v R 110 kV Sokolnice.....	70
Obr. 7-2: Schéma UO Sokolnice při výpadku přípojnice C s T403	74
Obr. 8-1: Srovnání zatížení - obě základní varianty zapojení	79
Obr. 8-2: Zatížení zkratovým výkonem - obě základní varianty zapojení	81
Obr. 8-3: Srovnání napětí pro obě varianty zapojení s transformátory 220/110 kV	82
Obr. 8-4: Zatížení vedení pro obě varianty zapojení s transformátory 220/110 kV	83
Obr. 8-5: Srovnání napětí pro obě varianty zapojení s transformátory 400/110 kV	85
Obr. 8-6: Zatížení vedení pro obě varianty zapojení s transformátory 400/110 kV	86

SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1: Orientace činného a jalového výkonu podle typu uzlu:.....	23
Tab. 3-1: Pravděpodobnost výskytu jednotlivých zkratů v síti [3]	34
Tab. 4-1: Napěťový součinitel c podle ČSN-EN 60909 [6]	44
Tab. 6-1: Napěťové poměry v rozvodnách 110 kV - můstkové zapojení T202 a T203.....	62
Tab. 6-2: Transformátory dodávající výkon – můstkové zapojení T202 a T203	63
Tab. 6-3: Transformátory odebírající výkon – můstkové zapojení T202 a T203	63
Tab. 6-4: Zatížení vedení - můstkové zapojení T202 a T203	64
Tab. 6-5: Celková bilance - můstkové zapojení T202 a T203	65
Tab. 6-6: Zkratové poměry - můstkové zapojení T202 a T203.....	65
Tab. 6-7: Napěťové poměry v rozvodnách 110 kV - výpadek přípojnice C, T203 v provozu	67
Tab. 6-8: Transformátory dodávající výkon - výpadek přípojnice C, T203 v provozu	67
Tab. 6-9: Zatížení vedení - výpadek přípojnice C, T203 v provozu	68
Tab. 6-10: Celková bilance - výpadek přípojnice C, T203 v provozu	68
Tab. 7-1: Napěťové poměry v rozvodnách 110 kV - můstkové zapojení T402 a T403.....	70
Tab. 7-2: Transformátory dodávající výkon – můstkové zapojení T402 a T403	71
Tab. 7-3: Transformátory odebírající výkon – můstkové zapojení T402 a T403	71
Tab. 7-4: Zatížení vedení - můstkové zapojení T402 a T403	72
Tab. 7-5: Celková bilance - můstkové zapojení T402 a T403	73
Tab. 7-6: Zkratové poměry - můstkové zapojení T402 a T403.....	73
Tab. 7-7: Napěťové poměry v rozvodnách 110 kV - výpadek přípojnice C, T402 v provozu	75
Tab. 7-8: Transformátory dodávající výkon - výpadek přípojnice C, T402 v provozu	75
Tab. 7-9: Zatížení vedení - výpadek přípojnice C, T402 v provozu	76
Tab. 7-10: Celková bilance - výpadek přípojnice C, T402 v provozu	76
Tab. 8-1: Srovnání napětí pro obě základní varianty zapojení	78
Tab. 8-2: Zatížení vedení pro obě základní varianty zapojení	79
Tab. 8-3: Zatížení transformátorů pro obě základní varianty zapojení	80
Tab. 8-4: Celkové ztráty pro obě základní varianty zapojení.....	80
Tab. 8-5: Porovnání zkratových poměrů pro obě základní varianty zapojení.....	80
Tab. 8-6: Srovnání napětí pro obě varianty zapojení s transformátory 220/110 kV	82
Tab. 8-7: Zatížení vedení pro obě varianty zapojení s transformátory 220/110 kV	83

Tab. 8-8: Zatížení transformátorů 220/110 kV pro obě varianty zapojení.....	84
Tab. 8-9: Celkové ztráty pro obě varianty zapojení s transformátory 220/110 kV	84
Tab. 8-10: Srovnání napětí pro obě varianty zapojení s transformátory 400/110 kV	85
Tab. 8-11: Zatížení vedení pro obě varianty zapojení s transformátory 400/110 kV	86
Tab. 8-12: Zatížení transformátorů 400/110 kV pro obě varianty zapojení.....	87
Tab. 8-13: Celkové ztráty pro obě varianty zapojení s transformátory 400/110 kV	87

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Veličina	Jednotka
\overline{abc}	Komplexní veličina	-
\overline{a}	Operátor natočení	-
c	Napětový součinitel	-
d	Střední geometrická vzdálenost vodičů	m
e	Eulerovo číslo	-
E	Napětí ekvivalentního zdroje	V
$\overline{E''}$	Fázor rázového napětí generátoru	V
$\overline{E_{(1)}}, \overline{E_{(2)}}, \overline{E_{(0)}}$	Sousledná, zpětná a nulová složka napětí zdroje	V
f	Funkce	-
f	Frekvence	Hz
I	Efektivní hodnota proudu (absolutní hodnota fázoru proudu)	A
$\overline{I_{(1)}}, \overline{I_{(2)}}, \overline{I_{(0)}}$	Sousledná, zpětná a nulová složka proudu	A
\overline{I}^*	Komplexně sdružený fázor proudu v uzlu i	A
$\overline{I_A}, \overline{I_B}, \overline{I_C}$	Fázor proud fáze A, B, C	V
I_b	Symetrický vypínací zkratový proud	A
$I_{d.c.}$	Stejnoseměrná složka vypínacího zkratového proudu	A
$\overline{I_i}$	Fázor proudu v uzlu i	A
i_k	Okamžitá hodnota zkratového proudu	A
I_k	Efektivní hodnota ustáleného zkratového proudu	A
I_k''	Počáteční souměrný rázový zkratový proud	A
$^{(1)}I_k''$	Počáteční souměrný rázový zkratový proud při jednofázovém zkratu	A
$^{(3)}I_k''$	Počáteční souměrný rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu	A
I_k'	Počáteční efektivní hodnota tranzitního zkratového proudu	A
I_{nT}	Jmenovitý proud transformátoru na straně 110 kV	A
I_p	Nárazový zkratový proud	A
I_r	Jmenovitý proud	A
I_{th}	Ekvivalentní oteplovací proud	A
I_V	Proud vedení	A
i	Číslo uzlu	-
i	Poměrná hodnota proudu	-
i_{zT}	Procentuální proudové zatížení transformátoru	%
i_{ka}	Okamžitá hodnota stejnosměrné složky zkratového proudu	A
i_{ks}	Okamžitá hodnota souměrného střídavého zkratového proudu	A
J	Jakobián	-
j	Číslo uzlu	-
j	imaginární jednotka	-
k	Počet uzlů (P, Q)	-
K	Korekční součinitel zkratové impedance	-

k_I	Součinitel respektující různé druhy zkratů	-
m	Součinitel tepelných účinků stejnosměrné složky zkratového proudu	-
n	Počet uzlů soustavy	-
n	Součinitel tepelných účinků střídavé složky zkratového proudu	-
n	Počet vodičů ve svazku	-
P	Činný výkon	W
P_i	Činný výkon v uzlu i	W
P_i (zadáno)	Zadaný činný výkon v uzlu i	W
P_{krT}	Jmenovité ztráty transformátoru nakrátko	W
Q	Jalový výkon	VAr
Q	Joulovo teplo	J
Q_i	Jalový výkon v uzlu i	VAr
Q_i (zadáno)	Zadaný jalový výkon v uzlu i	VAr
Q_j	Jalový výkon v uzlu j	VAr
R	Rezistence	Ω
r	Poloměr	m
R	Poloměr svazku	m
r_B	Ekvivalentní poloměr svazkových vodičů	m
R_{Gf}	Fiktivní rezistence generátoru	Ω
s	Poměrná hodnota zdánlivého výkonu	-
S	Zdánlivý výkon	VA
\bar{S}	Komplexní zdánlivý výkon	VA
\bar{S}_i	Fázor zdánlivého výkonu v uzlu i	VA
$^{(1)}S_k''$	Počáteční rázový zkratový výkon při jednofázovém zkratu	VA
$^{(3)}S_k''$	Počáteční rázový zkratový výkon při trojfázovém zkratu	VA
S_n	Jmenovitý průřez vodiče	mm ²
S_{nT}	Jmenovitý výkon transformátoru	VA
S_r	Jmenovitý výkon	VA
$^{(1)}S_k''$	Procentuální zatížení zkratovým výkonem při jednofázovém zkratu	%
$^{(3)}S_k''$	Procentuální zatížení zkratovým výkonem při trojfázovém zkratu	%
t	Čas	s
t_k	Doba trvání zkratu	s
tr	Jmenovitý převod transformátoru	-
U	Efektivní hodnota napětí (absolutní hodnota)	V
$\overline{U}_{(1)}, \overline{U}_{(2)}, \overline{U}_{(0)}$	Sousledná, zpětná a nulová složka napětí	V
\overline{U}_i^*	Komplexně sdružený fázor napětí v uzlu i	V
$\overline{U}_A, \overline{U}_B, \overline{U}_C$	Fázor napětí fáze A, B, C	V
U_b	Nejvyšší provozní napětí před zkratem	V
\overline{U}_i	Fázor napětí v uzlu i	V
\overline{U}_j	Fázor napětí v uzlu j	V

U_m	Nejvyšší dovolené napětí	V
U_n	Jmenovité napětí	V
u	Poměrná hodnota napětí	-
u_0	Okamžitá hodnota napětí na začátku poruchy	V
u_{kr}	Jmenovité napětí transformátoru nakrátko	%
u_{Rr}	Činná složka jmenovitého napětí nakrátko transformátoru	%
x	Proměnná	-
x	Poměrná reaktance	-
X	Induktivní reaktance	Ω
X'	Poměrná reaktance	Ωm^{-1}
X_d	Synchronní reaktance generátoru	Ω
X_d''	Rázová reaktance generátoru v ose d	Ω
x_d''	Poměrná rázová reaktance generátoru	-
X_q''	Rázová reaktance generátoru v ose q	Ω
\bar{Y}	Admitance	S
y	Proměnná	-
\bar{Y}_{ii}	Diagonální prvek admitanční uzlové matice	S
\bar{Y}_{ij}	Mimodiagonální prvek admitanční uzlové matice	S
y_{ij}	Admitance větve mezi uzly i a j	S
\bar{Z}	Impedance	Ω
$\bar{Z}_{(1)}, \bar{Z}_{(2)}, \bar{Z}_{(0)}$	Sousledná, zpětná a nulová složka impedance	Ω
\bar{Z}_k	Celková zkratová impedance	Ω
α	Úhel fázoru proudu	$^\circ$
α	Počáteční fáze fázoru napětí v okamžiku vzniku zkratu	$^\circ$
α	Teplotní součinitel elektrického odporu	K^{-1}
δ	Úhel fázoru napětí	$^\circ$
ε	Přesnost iterace	-
κ	Součinitel nárazového zkratového proudu	-
μ_0	Permeabilita vakua	H/m
π	Ludolfovo číslo	-
ρ	Měrná rezistivita	$\Omega\text{mm}^2\text{m}^{-1}$
τ_d''	Subtranzitní časová konstanta	s
τ_d'	Tranzitní časová konstanta	s
τ_s	Časová konstanta stejnosměrné složky	s
v	Teplota vodiče	$^\circ\text{C}$
φ	Úhel fázoru zdánlivého výkonu	$^\circ$
Φ	Funkce zahrnující členy vyšších mocnin druhé a vyšší derivace f	-
φ_k	Úhel fázoru impedance obvodu zkratového proudu	$^\circ$
ω	Úhlová rychlost	rad.s^{-1}
ΔP	Změna činného výkonu	W
ΔP_{ij}	Ztráta činného výkonu mezi uzly i a j	W
ΔP_T	Činné ztráty transformátoru	W
ΔP_V	Ztráty činného výkonu na vedení	W

ΔQ	Změna jalového výkonu	VAr
ΔQ_{ij}	ztráta jalového výkonu mezi uzly i a j	VAr
ΔU	Rozdíl napětí	V
ΔU_i	Diference absolutní hodnoty napětí v uzlu i	V
Δx_i	Diference odhadu i -tého kořenu od přesné hodnoty	-
$\Delta \delta_i$	Diference úhlu napětí v uzlu i	°
$\sum P_{dodT}$	Celkový činný dodávaný výkon	W
$\sum P_{odbT}$	Celkový činný odebíraný výkon	W
$\sum \Delta P_T$	Celkové činné ztráty transformátorů	W

Zkratka

DS	Distribuční síť
ES	Elektrizační soustava
Im	Imaginární osa
NN	Nízké napětí
R	Rozvodna
Re	Reálná osa
SŽDC	Správa železniční dopravní cesty
UO	Uzlová oblast
VN	Vysoké napětí
VVN	Velmi vysoké napětí
ZVN	Zvláště vysoké napětí

1 ÚVOD

Elektrizační soustava představuje vzájemné propojení prvků, které slouží k výrobě, přenosu, transformaci a distribuci elektřiny. Součástí ES jsou i další prvky a zařízení, které se přímo nepodílí na přenosu elektrické energie (např. ochrany, systémy měření, informační a telekomunikační technologie atd.).

V České republice se ES skládá z přenosové soustavy o napětí 400 kV a 220 kV a distribuční soustavy provozující síť o napětí 110 kV a nižším. Přenosovou síť provozuje společnost ČEPS, a.s., distribuční síť je rozdělena mezi tři společnosti – ČEZ Distribuce, a.s., E.ON Distribuce, a.s. a PREdistribuce, a.s..

Procesy výroby, přenosu a spotřeby jsou velmi dynamické. V každém okamžiku se musí vyráběný výkon rovnat spotřebovávanému se zahrnutím ztrát. Ustálený chod ES reprezentuje rovnovážný stav tohoto dynamického systému, kdy se nemění stavové veličiny. Z důvodu neustálých změn v zatížení, konfiguraci sítě nebo poruch však tento stav nikdy nenastává.

Nejzávažnějšími poruchami z pohledu mechanického a tepelného zatížení zařízení jsou zkrat. Ty mohou vzniknout vlivem vady zařízení (stárnutí izolace), přepětím, cizím zaviněním (pád stromu) nebo i lidskou chybou. Z důvodu velkého zatížení elektrických zařízení vlivem účinků zkratových proudů se zařízení dimenzují na nejtěžší zkratové proudy, které se mohou v dané topologii sítě objevit.

1.1 Cíle práce

Hlavním cílem práce je výpočet a vyhodnocení můstkového provozu transformátorů T402 a T403 v rozvodně Sokolnice. Toto zapojení by se mělo provozovat po roce 2017, když bude instalován nový transformátor T403. V současnosti jsou v Sokolnici provozovány transformátory T202 a T203 v můstkovém zapojení, které napájí distribuční síť 110kV na jižní Moravě. Transformátor T402 napájí oblast Brna.

Pro můstkové zapojení transformátorů T202 a T203 a pro můstkové zapojení T402 a T403 je spočítán ustálený chod sítě a zkratové poměry. Dále je vypočítán ustálený chod při mimořádném stavu, kdy je porucha na jednom přípojnicovém systému. Vyhodnoceny jsou napětí v jednotlivých rozvodnách, zatížení vedení, zatížení transformátorů a celková bilance sítě.

Cílem teoretické části práce je popsat a vysvětlit výpočet ustáleného chodu, především Newtonovou iterační metodou, se kterou pracuje program *SINAUT SPECTRUM 4.4*, na němž byly provedeny výpočty chodu sítě. Teoretická část se dále zabývá výpočtem zkratů.

2 USTÁLENÝ CHOD SÍTÍ ZVN A VVN

Ustáleným chodem elektrizační soustavy se myslí takový stav, při kterém nastává rovnováha všech veličin určujících její chod, jako jsou např. napětí, proudy, výkony, mechanické momenty rotujících strojů atd. V ustáleném stavu neexistují přechodné s časem zanikající složky veličin chodu sítě. Ve skutečnosti ale takový stav nemůže nikdy nastat, jelikož probíhají neustálé změny zatížení a výkonů zdrojů, konfigurace sítě atd., a tedy neustále probíhá nějaký přechodný jev.

Sítě 400 kV a 220 kV mají charakter přenosových vedení. Přenášený výkon dosahuje stovek MW, délky vedení se pohybují v rozmezí desítek až stovek kilometrů. Sítě 110 kV mají charakter distribučních vedení. Rozlehlost těchto sítí a velikost napětí neumožňuje použít při řešení ustáleného chodu taková zjednodušení, kterých se využívá při řešení sítí NN a VN (zanedbání příčné admitance, odběry zadané pomocí proudů nezávislých na napětí).

Proudy v příčném směru přenosu (konduktanci a kapacitami vodičů) jsou řádově srovnatelné s proudy odběrů a mají tedy podstatný vliv na ztráty výkonu a úbytky napětí.

Rozdíly fázorů napětí v uzlech sítě jsou podstatně větší než u nižších napěťových hladin jak v absolutní hodnotě, tak i ve fázovém posunu. Pro výpočet proudu odběrů a zdrojů z výkonů nelze využít jmenovité nebo jiné napětí pro všechny uzly sítě stejné, neboť jsou velké rozdíly v amplitudě i fázovém posunu.

Pro výpočet ustáleného chodu sítí ZVN a VVN se uvažují tyto zjednodušení:

1. Parametry vedení, transformátorů a dalších prvků soustavy jsou konstanty nezávislé na proudu nebo na napětí.
2. Napětí zdrojů a odběrů jsou harmonické funkce času s frekvencí 50 Hz.
3. U trojfázových soustav předpokládáme symetrii prvků v parametrech, u odběrů a zdrojů v napětí a proudech

Znalost činných a jalových výkonů, ztrát a napěťových poměrů v jednotlivých prvcích a uzlech ES je nutná pro řízení provozu, i navrhování budoucího rozvoje ES. Vypočítané hodnoty při ustáleném chodu jsou dále využívány jako výchozí data pro výpočet přechodných dějů (zkratové poruchy, statická a dynamická stabilita) a řady optimalizačních úloh (hospodárné rozdělení výroby, regulace napětí, hodnocení spolehlivosti).

Výpočet se zpravidla provádí pro minimální a maximální zatížení sítě. V praxi jsou odběry a dodávky určeny činnými a jalovými výkony, to má ale za následek, že chod sítě nemůžeme definovat soustavou lineárních rovnic. Pro přesný výpočet ustáleného chodu je nutné použít soustavy nelineárních rovnic, pro jejichž řešení musíme využít některé z iteračních metod. Výpočet iteračními metodami je relativně časově dlouhý a konvergence výpočtu není vždy zaručena. U některých výpočtů ustáleného chodu, při nichž není nutná velká přesnost, se výpočet linearizuje. Mohou to být výpočty pro dlouhodobé plánování rozvoje sítí či výpočty spolehlivosti. Výkony zadané v jednotlivých uzlech se převedou na proudy a to podělením střední hodnotou očekávaného napětí v daném uzlu sítě nebo napětím jmenovitým.

Pro sestavení základních rovnic ustáleného chodu můžeme použít některou z metod řešení lineárních obvodů, metodu uzlových napětí nebo metodu smyčkových proudů. Nejčastěji se

využívá metody uzlových napětí pro její jednoduchý algoritmus výpočtu vlastních a vzájemných uzlových admitancí a snadné propojení jednotlivých větví sítě. Předpokládáme také, že ES obsahuje pouze souměrné zdroje a souměrné přenosové prvky a odběry. Následně můžeme soustavu řešit jako jednofázovou síť.

Text kapitoly byl vytvořen podle [1], [2].

2.1 Klasifikace uzlů a podmínky určitosti chodu sítě

Ustálený chod sítě je jednoznačně definován znalostí čtyř uzlových veličin:

- Absolutní hodnotou napětí U
- Úhlem napětí δ
- Činným výkonem P
- Jalovým výkonem Q

Na základě veličin (U, δ, P, Q) můžeme uzly rozdělit podle toho, jak jsou zadány a které jsou pomocí rovnic ustáleného chodu dopočítány. V souladu s požadavky praxe se uzly dělí dle zadaných uzlových veličin do tří základních tříd:

1. **Třída (U, δ) – bilanční uzel.** Je to uzel značený ve schématu číslem 1, ve kterém je zadáno napětí a jeho úhel. Jako neznámé se musí dopočítat činný a jalový výkon. Tento uzel má dorovnávat případnou nerovnováhu v rozdělení uzlových výkonů. Dále též hradí ztráty činného a jalového výkonu v síti, které jsou známy až po ukončení výpočtu a určení výsledné bilance. Zpravidla se jako bilanční uzel volí jeden ze zdrojů o dostatečném výkonu.
2. **Třída (P, Q) .** Je to uzel se zadaným činným a jalovým výkonem buď dodávaným (+), nebo odebíraným (-) z uzlu. Jako neznámé se vypočítá napětí a jeho úhel.
3. **Třída (U, P) – regulační nebo kompenzační uzel.** Jsou to uzly se zadaným činným výkonem a absolutní hodnotou napětí. Při výpočtu se řeší, jaký jalový výkon musí být v tomto uzlu odebírán nebo dodáván, aby byla dodržena daná hodnota napětí. Dopocítává se hodnota úhlu tohoto napětí.

Při praktických výpočtech ustáleného chodu ES se zadává:

- Jeden bilanční (U, δ) uzel
- k uzlů (P, Q)
- $(n-k-1)$ uzlů (U, P) , kde n je počet uzlů soustavy

Následně máme k dispozici $2(n-1)$ rovnic popisujících ustálený chod.

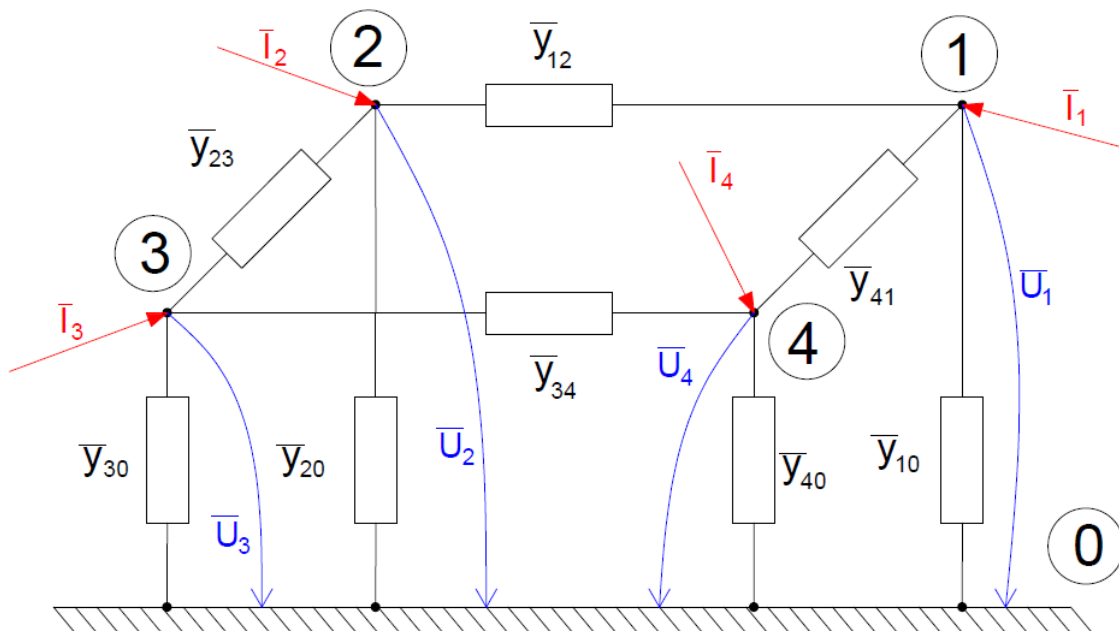
Rychlost konvergence zvolené iterační metody závisí na konfiguraci sítě a volbě bilančního uzlu, který by měl mít dostatečný dodávaný výkon. Ten hradí výkonové ztráty sítě a případnou nerovnováhu v bilanci dodávek a odběrů. Rychlost konvergence závisí také na počtu a umístění uzlů třídy (P, Q) a (U, P) . Bilanční uzel by se měl volit v „elektrickém středu“ sítě, tomu obvykle vyhovuje uzel mající největší vlastní admitanci (největší diagonální prvek v uzlové admitanční matici). Ne vždy je v tomto uzlu k dispozici „volný“ generátor, a tak je možné volit generátor na krytí ztrát i v jiném uzlu sítě než ve kterém volíme zadané napětí a úhel. V tomto případě je nutno rozšířit uvedenou základní klasifikaci uzlů a blíže specifikovat podmínky určitosti chodu

sítě. Dále můžeme krytí ztrát v síti rozdělit na všechny generátory pracující do soustavy, což však komplikuje matematické řešení. Proto se uvažují pouze uzly základních tříd (U, δ), (P, Q) a (U, P).

Text kapitoly byl vytvořen podle [2].

2.2 Výpočet ustáleného chodu jako lineární úloha

Při výpočtu ustáleného chodu jako lineární úlohy předpokládáme, že máme zadány odebírané a dodávané proudy do uzlů sítě. Prvky soustavy se vyznačují podélnými a říčními admitancemi, vedení se nejčastěji nahrazují π -čláčky, transformátory Γ -čláčky. Příčné admitance jsou spojeny mezi daný uzel sítě a referenční uzel s nulovým potenciálem (zem). Dále se předpokládá, že všechny parametry jsou přepočítány na jedno společné vztažné napětí a tak můžeme ES nahradit galvanickým spojením prvků.



Obr. 2-1: Náhradní schéma sítě

Síť z Obr. 2-1 můžeme matematicky popsat pomocí metody uzlových napětí soustavou rovnic

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \\ \bar{I}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & \bar{Y}_{12} & \bar{Y}_{13} & \bar{Y}_{14} \\ \bar{Y}_{21} & \bar{Y}_{22} & \bar{Y}_{23} & \bar{Y}_{24} \\ \bar{Y}_{31} & \bar{Y}_{32} & \bar{Y}_{33} & \bar{Y}_{34} \\ \bar{Y}_{41} & \bar{Y}_{42} & \bar{Y}_{43} & \bar{Y}_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_2 \\ \bar{U}_3 \\ \bar{U}_4 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

v níž $\bar{U}_1, \bar{U}_2, \bar{U}_3, \bar{U}_4$ jsou neznámá uzlová napětí a $\bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_3, \bar{I}_4$ jsou zadané uzlové proudy, kde znaménko „+“ značí dodávku a „-“ odběr. Tuto soustavu můžeme zkráceně přepsat do maticového tvaru

$$[\bar{I}] = [\bar{Y}] \cdot [\bar{U}] \quad (2.2)$$

Prvky admitanční uzlové matice $[\bar{Y}]$ jsou sestaveny podle algoritmu vycházejícího z druhého Kirchhoffova zákona tak, že:

- i -tý diagonální prvek \bar{Y}_{ii} je tvořen součtem admitancí všech větví vycházejících s i -tým uzlem
- mimodiagonální prvek $\bar{Y}_{ij} (i \neq j)$ je tvořen záporně vzatým součtem všech impedancí, které jsou mezi i -tým a j -tým uzlem.

Přitom se předpokládá, že větve nemají vzájemné induktivní vazby. Takže například pro diagonální a mimodiagonální prvek soustavy na Obr. 2-1 platí:

$$\begin{aligned}\bar{Y}_{22} &= \bar{y}_{12} + \bar{y}_{23} + \bar{y}_{20} \\ \bar{Y}_{21} &= \bar{Y}_{12} = -\bar{y}_{12}\end{aligned}\quad (2.3)$$

Pro rozlišení se značí uzlové veličiny a prvky admitanční uzlové matice velkými písmeny a admitance jednotlivých větví a větvové proudy malými písmeny.

Soustavu rovnic (2.2) můžeme zapsat také ve tvaru

$$\bar{I}_j = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{U}_j \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.4)$$

kde n je počet uzlů v síti mimo uzel referenční, který se pro zjednodušení značí číslem 0. Pokud by se neuvažovali příčné admitance, pak by matice $[\bar{Y}]$ byla singulární a soustava rovnic (2.2) a (2.4) byla závislá. Závislost se odstraní eliminací bilančního uzlu.

Text kapitoly byl vytvořen podle [2].

2.2.1 Eliminace bilančního uzlu

Soustava rovnic (2.1), která je sestavená pomocí II. Kirchhoffova zákona pro síť na Obr. 2-1 je nezávislá, z čehož vyplývá, že matice $[\bar{Y}]$ je regulární. Nyní zavedeme bilanční uzel, který hradí neznámé proudy tekoucí příčnými větvemi a vyrovnává bilanci mezi dodávkami a odběry. Aby byl v rovnicích (2.1) a (2.4) stejný počet neznámých jako je rovnic, je nutné zadat v bilančním uzlu napětí. Pro formální zjednodušení zápisu se pro bilanční uzel používá číslo 1.

Jelikož máme v bilančním uzlu známé napětí, tak můžeme soustavu rovnic (2.1) přepsat do tvaru

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \\ \bar{I}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{21} \cdot \bar{U}_1 \\ \bar{Y}_{31} \cdot \bar{U}_1 \\ \bar{Y}_{41} \cdot \bar{U}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{Y}_{22} & \bar{Y}_{23} & \bar{Y}_{24} \\ \bar{Y}_{32} & \bar{Y}_{33} & \bar{Y}_{34} \\ \bar{Y}_{42} & \bar{Y}_{43} & \bar{Y}_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_2 \\ \bar{U}_3 \\ \bar{U}_4 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

a analogicky s rovnicí (2.4)

$$\bar{I}_j = \bar{Y}_{j1} \cdot \bar{U}_1 + \sum_{j=2}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{U}_j = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{U}_j \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (2.6)$$

Po vypočítání neznámých napětí $\overline{U}_2, \overline{U}_3, \dots, \overline{U}_n$, se neznámý proud \overline{I}_1 v bilančním uzlu zpravidla dopočítá při určení jednotlivých proudů ve větvích sítě. Vypuštění rovnice pro bilanční uzel ze vztahů (2.5) a (2.6) se nazývá eliminací bilančního uzlu. Soustava (2.6) se může řešit například eliminační metodou, iteračními metodami nebo přímou inverzí admitanční matice řádu $(n-1)$. Po provedení výpočtu uzlových napětí určíme rozdělení proudů ve větvích náhradního schématu pomocí vztahu

$$\overline{i}_{pq} = \overline{y}_{pq} \cdot (\overline{U}_p - \overline{U}_q) \quad (2.7)$$

kde \overline{i}_{pq} je proud tekoucí větví o admitanci \overline{y}_{pq} z uzlu p do uzlu q .

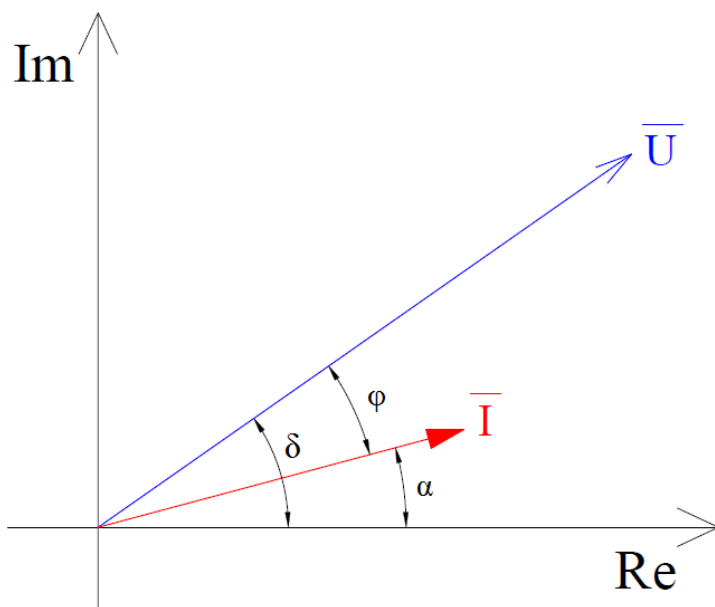
Text kapitoly byl vytvořen podle [2].

2.3 Výpočet ustáleného chodu jako nelineární úloha

Při výpočtech prováděných v praxi jsou odběry a dodávky v uzlech zadávány činnými a jalovými výkony. Pro i -tý uzel lze tedy napsat

$$\overline{S}_i = P_i + jQ_i = \overline{U}_i \cdot \overline{I}_i^* \quad (2.8)$$

kde \overline{I}_i^* je komplexně sdružený proud k proudu \overline{I}_i . Znaménko u činného a jalového výkonu podle rovnice (2.8) je vysvětleno na fázorovém diagramu napětí a proudu Obr. 2-2 v uzlu se zdrojem, v němž je činný výkon dodáván do sítě. Fázorový diagram ukazuje výrobu činného a jalového výkonu s induktivním fázovým posunem.



Obr. 2-2: Fázorový diagram induktivní dodávky do uzlu

Dodávaný zdánlivý výkon do uzlu sítě tedy je

$$\overline{S} = P + jQ = \overline{U} \cdot \overline{I}^* = U \angle \delta \cdot I \angle -\alpha = UI \angle \varphi = S(\cos \varphi + j \sin \varphi) \quad (2.9)$$

kde je fázový posun napětí a proudu $\varphi = \delta - \alpha$. Odtud vyplývá, že je-li induktivní posun proudu vůči napětí (proud je zpožděný za napětím) pak platí $\varphi > 0$, $P > 0$, $Q > 0$.

V případě odběru uvažujeme proud záporně. Tímto se změní znaménko u činného i jalového výkonu oproti uzlu s dodávkou. Nejlépe je to vidět v následující tabulce, v níž uvažujeme orientaci toku výkonu (proudu) do uzlu šipkou.

Tab. 2-1: Orientace činného a jalového výkonu podle typu uzlu:

Uzel: Posun proudu:	Zdroj $P > 0$	Odběr $P < 0$
induktivní $\varphi > 0$	$Q > 0$	$Q < 0$
kapacitní $\varphi < 0$	$Q < 0$	$Q > 0$

Proud vyjádřený z rovnice (2.8) je

$$\overline{I_i} = \frac{\overline{S_i^*}}{\overline{U_i^*}} = \frac{P_i - jQ_i}{\overline{U_i^*}} \quad (2.10)$$

Po dosazení do vztahu (2.6) vychází rovnice

$$\overline{I_i} = \frac{P_i - jQ_i}{\overline{U_i^*}} = \sum_{j=1}^n \overline{Y_{ij}} \cdot \overline{U_j} \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (2.11)$$

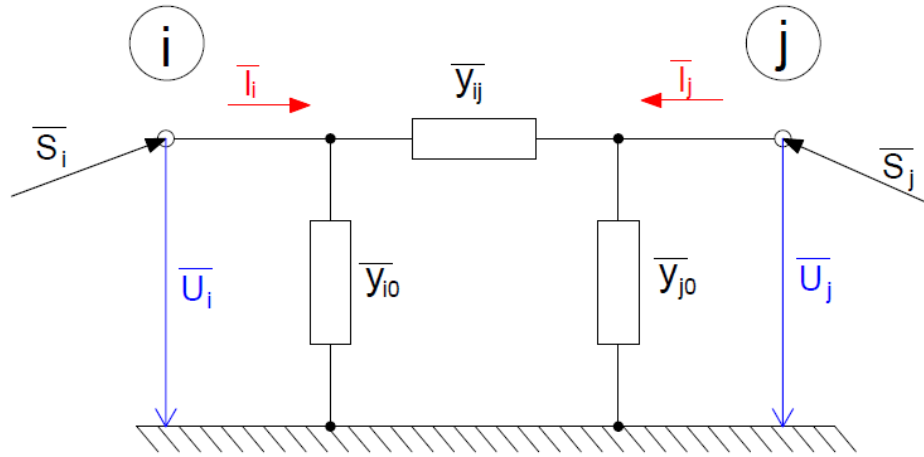
Z rovnic (2.6) a (2.10) je zřejmé, že byla provedena eliminace bilančního uzlu a z toho vycházející volba napětí U_1 . V našem případě, kdy jsou zadány uzlové výkony, hradí bilanční uzel rozdíl mezi dodávkami a odběry a kryje také ztráty činného a jalového výkonu v síti.

Pro výpočet soustavy rovnic (2.11) se nejvíce využívají dvě iterační metody - Gauss-Seidlova a Newtonova iterační metoda. Jelikož jsou zadány výkony v uzlech sítě, napětí bilančního uzlu a admitance, vede výpočet neznámých napětí k soustavě nelineárních kvadratických rovnic. Po výpočtu hledaných napětí se určí toky výkonů v síti a ztráty.

Jednotlivé prvky sítě jsou nejčastěji nahrazovány π -články, proud tekoucí do uzlu je poté určen vztahem (2.12) a výkon rovnicí (2.13).

$$\overline{I_i} = (\overline{U_i} - \overline{U_j}) \cdot \overline{y_{ij}} + \overline{U_i} \cdot \overline{y_{i0}} \quad (2.12)$$

$$\overline{S_i} = P_i + jQ_i = \overline{U_i} \cdot \overline{I_i^*} \quad (2.13)$$

Obr. 2-3: Náhrada prvku π -článkem

Podle zavedeného pravidla, je-li $P_i > 0$, pak činný výkon vtéká do uzlu i . Znaménko jalového výkonu pak značí, zda jde o výkon induktivní nebo kapacitní.

Analogicky proud a výkon pro uzel j

$$\begin{aligned}\overline{I_j} &= (\overline{U_j} - \overline{U_i}) \cdot \overline{y_{ij}} + \overline{U_j} \cdot \overline{y_{j0}} \\ \overline{S_j} &= P_j + jQ_j = \overline{U_j} \cdot \overline{I_j}^*\end{aligned}\quad (2.14)$$

Ztráty činného a jalového výkonu v tomto náhradním článku dostáváme algebraickým součtem výkonů tekoucích do uzlů i, j :

$$\begin{aligned}\Delta P_{ij} &= P_i + P_j \\ \Delta Q_{ij} &= Q_i + Q_j\end{aligned}\quad (2.15)$$

Uvažujeme, že trojfázová síť je v našem případě nahrazena jednofázovým ekvivalentem, a tak pro všechny rovnice platí fázové hodnoty napětí a výkon přenášený jednou fází.

Text kapitoly byl vytvořen podle [2].

2.3.1 Výpočet ustáleného chodu Gauss-Seidlovou metodou

Tato metoda se vyznačuje jednoduchým algoritmem výpočtu a potřebuje vzhledem k jiným iteračním metodám poměrně krátkou dobu na výpočet jednoho kroku iterace. Nevýhoda je její pomalá konvergence. Při výpočtu je nutné volit vysokou přesnost výpočtu, jinak se může stát, že nepřesně určená napětí způsobí značnou chybu v tocích výkonů a uzlových bilancích výkonů. Tyto nevýhody odstraňuje Newtonova iterační metoda, a proto bude dále popsána pouze ta.

Text kapitoly byl vytvořen podle [2].

2.3.2 Výpočet ustáleného chodu Newtonovou iterační metodou

Máme řešit soustavu nelineárních rovnic ve tvaru

$$\begin{aligned}f_1 &= (x_1, x_2, \dots, x_n) = y_1 \\ f_2 &= (x_1, x_2, \dots, x_n) = y_2 \\ f_n &= (x_1, x_2, \dots, x_n) = y_n\end{aligned}\quad (2.16)$$

Nejdříve provedeme odhad kořenů pro nultou iteraci $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$. Odhady kořenů se liší od jejich přesné hodnoty o $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$. Přesně určená hodnota kořenů tedy je $x_1 = x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2 = x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n = x_n^{(0)} + \Delta x_n$. Původní soustavu rovnic (2.16) tedy můžeme přepsat na tvar

$$\begin{aligned} f_1(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_1 \\ f_2(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_2 \\ \vdots \\ f_n(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_n \end{aligned} \quad (2.17)$$

Každá rovnice ze soustavy (2.17) lze rozepsat na Taylorovu řadu funkce více proměnných v bodě $x_i^{(0)}$ pro příklad 1. rovnice

$$f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 \Delta x_1 + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 \Delta x_2 + \dots + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \Delta x_n + \phi = y_1 \quad (2.18)$$

kde $\left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0$ je hodnota parciální derivace v bodě $x_1^{(0)}$ atd. Člen ϕ zahrnuje členy s vyššími mocninami $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ a druhé a vyšší derivace funkce f_1 .

Jsou-li odhady kořenů blízké přesné hodnotě, difference Δx_i jsou malé a všechny členy s vyššími mocninami Δx_i můžeme zanedbat jelikož $\phi \rightarrow 0$.

Označíme-li výraz $f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) = y_1^{(0)}$ pak můžeme rovnici (2.18) přepsat na tvar

$$\left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 \Delta x_1 + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 \Delta x_2 + \dots + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \Delta x_n = y_1 - y_1^{(0)} = \Delta y_1^{(0)} \quad (2.19)$$

kde člen $\Delta y_1^{(0)}$ je rozdíl mezi zadanou hodnotou pravé strany y_1 a hodnotou $y_1^{(0)}$, kterou jsme určili dosazením odhadu kořenů do rovnice (2.18).

Analogickým postupem můžeme takto upravit i zbývající rovnice soustavy (2.17), kde následně dostaneme soustavu lineárních rovnic pro výpočet neznámých diferencí $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$. Soustavu můžeme následovně přepsat do maticového tvaru.

$$\begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \\ \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \right|_0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \right|_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1^{(0)} \\ y_2^{(0)} \\ \vdots \\ y_n^{(0)} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Nebo lze také přepsat do zkrácené formy

$$[J] \cdot [\Delta x] = [\Delta y] \quad (2.21)$$

kde matice $[J]$ parciálních derivací je označována jako Jacobián. Ze soustavy rovnic (2.20) nebo (2.21) se vypočítá vektor hledaných diferencí $[\Delta x]$ a určí se nové, opravené odhady kořenů

$$x_i^{(1)} = x_i^{(0)} + \Delta x_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.22)$$

které použijeme pro výpočet v další iteraci. Z důvodu zanedbání derivací vyšších mocnin v Taylorově rozvoji, nejsou vypočítané difference zcela přesné.

Iterační proces postupného zpřesňování kořenů soustavy rovnic (2.14) můžeme přepsat pomocí rovnic (2.21) a (2.22) do iteračního tvaru

$$[\Delta x^{(k)}] = [J^{(k)}]^{-1} \cdot [\Delta y^{(k)}] \quad (2.23)$$

a potom

$$\Delta x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} + \Delta x_i^{(k)} \quad (2.24)$$

kde index k určuje k -tou iteraci.

Předpokládáme, že existují spojité derivace $\partial f_i / \partial x_j$ pro $i, j = 1, 2, \dots, n$ jednoznačnost řešení soustavy rovnic (2.20) a konvergence iteračního postupu, což v praktických úlohách výpočtu ustáleného chodu sítí je obvykle splněno.

Tuto iterační metodu nyní aplikujeme na rovnici (2.11), která popisuje ustálený chod sítí. Rovnici následně přepíšeme do tvaru podle rovnice (2.16)

$$P_i - jQ_i = \overline{U_i^*} \cdot \sum_{j=1}^n \overline{Y_{ij}} \cdot \overline{U_j}, \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (2.25)$$

Pravou stranu rovnice (2.25) rozepíšeme na reálnou a imaginární část. To můžeme provést zápisem fázorů napětí a komplexních admitancí ve složkovém nebo polárním tvaru. Pro výpočet je vhodné použít polární tvar, kde

$$\begin{aligned} \overline{U_i} &= U_i \angle \delta_i \\ \overline{U_i^*} &= U_i \angle -\delta_i \\ \overline{Y_{ij}} &= Y_{ij} \angle \alpha_{ij} \end{aligned} \quad (2.26)$$

Dosazením polárního tvaru napětí a admitancí do rovnice (2.25) a po úpravě s uvážením, že $\cos(-x) = \cos(x)$, $\sin(-x) = -\sin(x)$ dostaneme

$$\left. \begin{aligned} P_i &= \sum_{j=1}^n U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \\ Q_i &= \sum_{j=1}^n U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \end{aligned} \right\} i = 2, 3, \dots, n \quad (2.27)$$

Výsledné rovnice jsou soustavou $2(n-1)$ rovnic pro $(n-1)$ neznámých napětí a jejich úhlů. Předpokládáme, že ve všech uzlech jsou zadány dodávané nebo odebírané činné či jalové výkony kromě bilančního uzlu 1, který je definován napětím U_1 a úhlem δ_1 (úhel je v obvyklých výpočtech roven 0). Pro iterační výpočet diferencí ΔU_i a $\Delta \delta_i$ podle soustavy (2.20) a s použitím rovnic (2.27) dostáváme soustavu (2.28). V této soustavě ΔU_i představují diferenci odhadu uzlového napětí od přesné hodnoty kořenů rovnice (2.27).

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial U_2} & \frac{\partial P_2}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial U_n} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial P_3}{\partial U_2} & \frac{\partial P_3}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial P_3}{\partial U_n} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial U_2} & \frac{\partial P_n}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial U_n} & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial U_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial U_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial Q_3}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial U_2} & \frac{\partial Q_n}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta U_2 \\ \Delta U_3 \\ \vdots \\ \Delta U_n \\ \Delta \delta_2 \\ \Delta \delta_3 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Soustavu (2.28) můžeme zkráceně přepsat pomocí matic rozdělením na pole ve tvaru:

$$\begin{bmatrix} [\Delta P] \\ [\Delta Q] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[\frac{\partial P}{\partial U} \right] & \left[\frac{\partial P}{\partial \delta} \right] \\ \left[\frac{\partial Q}{\partial U} \right] & \left[\frac{\partial Q}{\partial \delta} \right] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [\Delta U] \\ [\Delta \delta] \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Nyní vypočítáme prvky (parciální derivace) Jacobiánu derivováním rovnic (2.27) podle jednotlivých proměnných.

a) Výpočet prvků matice $\frac{\partial P}{\partial U}$:

Diagonální prvky:

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_i} = 2U_i \cdot Y_{ii} \cdot \cos \alpha_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_j \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (2.30)$$

Mimodiagonální prvky $i \neq j$:

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_j} = U_i \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (2.31)$$

b) Výpočet prvků matice $\frac{\partial P}{\partial \delta}$:

Diagonální prvky:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (2.32)$$

Mimodiagonální prvky $i \neq j$:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (2.33)$$

c) Výpočet prvků matice $\frac{\partial Q}{\partial U}$:

Diagonální prvky:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_i} = -2U_i \cdot Y_{ii} \cdot \cos \alpha_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_j \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (2.34)$$

Mimodiagonální prvky $i \neq j$:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_j} = U_i \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (2.35)$$

d) Výpočet prvků matice: $\frac{\partial Q}{\partial \delta}$:

Diagonální prvky:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (2.36)$$

Mimodiagonální prvky $i \neq j$:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (2.37)$$

Text kapitoly byl vytvořen podle [2].

2.3.3 Algoritmus výpočtu Newtonovi iterační metody a zjednodušený výpočet

1. V nultém iteračním kroku $k = 0$ odhadneme napětí v uzlech sítě a jejich úhly (obvykle se zadává $\overline{U_i^{(0)}} = \overline{U_1}$, $i = 2, 3, \dots, n$).

2. Dosazením napětí do rovnice (2.27) vypočítáme difference výkonů

$$\begin{aligned} \Delta P_i^{(0)} &= P_{i(\text{zadáno})} - P_i(U_1, U_2^{(0)}, \dots, U_n^{(0)}, \delta_1, \delta_2^{(0)}, \dots, \delta_n^{(0)}) \\ \Delta Q_i^{(0)} &= Q_{i(\text{zadáno})} - Q_i(U_1, U_2^{(0)}, \dots, U_n^{(0)}, \delta_1, \delta_2^{(0)}, \dots, \delta_n^{(0)}) \end{aligned}$$

3. Dosazením odhadnutých napětí v nultém iteračním kroku do rovnic (2.30) až (2.37) získáme hodnoty prvků Jacobiánu.

4. Vyřešením soustavy rovnic (2.28) dostaneme hodnoty diferencí $\Delta U_i^{(0)}$, $\Delta \delta_i^{(0)}$ v nulté iteraci.

5. Vypočítáme opravené hodnoty napětí a jejich úhlů na konci první iterace

$$U_i^{(1)} = U_i^{(0)} + \Delta U_i^{(0)}$$

$$\delta_i^{(1)} = \delta_i^{(0)} + \Delta \delta_i^{(0)}, \quad i = 2, 3, \dots, n$$

6. Zpřesněnými napětími nahradíme původní odhady a celý postup výpočtu opakujeme. Horní index tedy postupně nabývá hodnot (0), (1), (2), ... podle jednotlivých iteračních kroků (k). Výpočet ukončíme, až budou splněny rovnice (2.38),

$$\left. \begin{array}{l} |\Delta P_i^{(k)}| \leq \varepsilon \\ |\Delta Q_i^{(k)}| \leq \varepsilon \end{array} \right\} i = 2, 3, \dots, n \quad (2.38)$$

kde ε je zvolená přesnost rozdílu zadaných výkonů a výkonů vypočítaných dosazením vypočítaných napětí a jejich úhlů do rovnic (2.27).

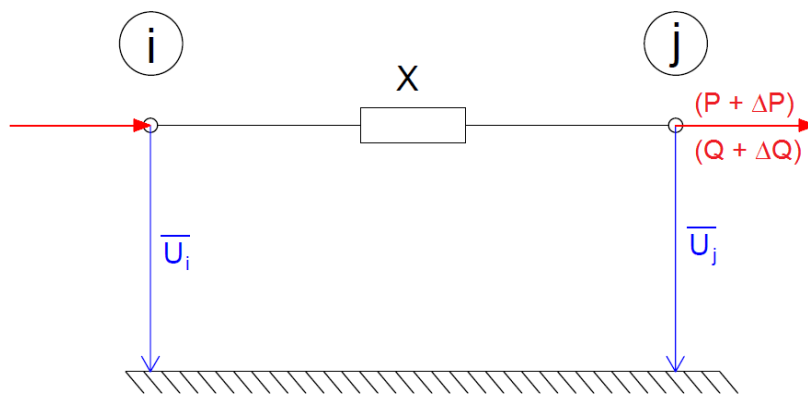
Pro orientační výpočty se využívá následující zjednodušení, kde se vychází z toho, že u sítí s převažující podélnou reaktancí vedení a transformátorů, se při malých změnách absolutní velikosti napětí činné výkony v uzlech téměř nemění. Podobně to platí pro malé změny úhlů uzlových napětí, kde se jalové výkony také mění zanedbatelně. Za těchto předpokladů můžeme do rovnic (2.29) dosadit

$$\left[\frac{\partial P}{\partial U} \right] \doteq [0], \quad \left[\frac{\partial Q}{\partial \delta} \right] \doteq [0] \quad (2.39)$$

a ta následně přejde na tvar (2.40) vedoucí ke zrychlení výpočtu.

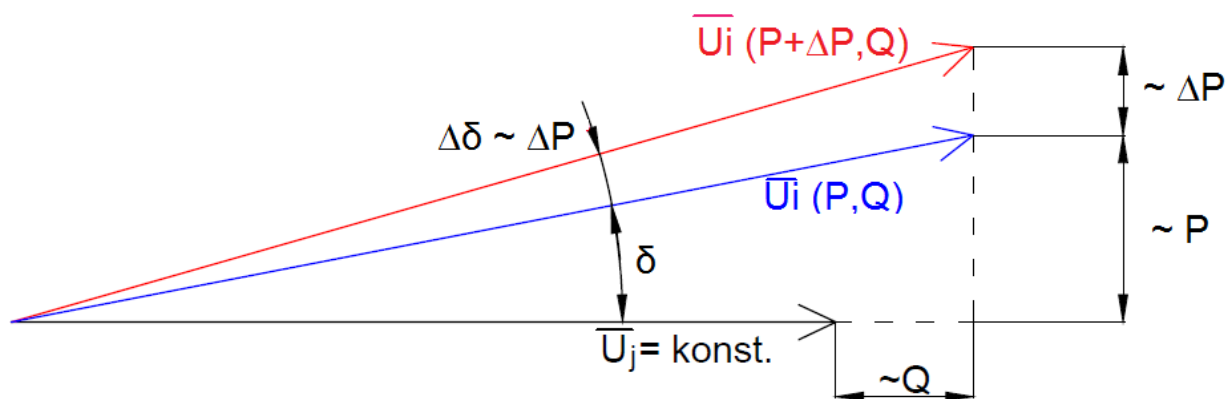
$$[\Delta P] \doteq \left[\frac{\partial P}{\partial \delta} \right] \cdot [\Delta \delta], \quad [\Delta Q] \doteq \left[\frac{\partial Q}{\partial U} \right] \cdot [\Delta U] \quad (2.40)$$

Pro názornost dokážeme vliv změn odebíraného výkonu na změnu velikosti napětí a jeho úhlu na jednoduchém přenosu s uvažováním pouze podélné reaktance podle Obr. 2-4.



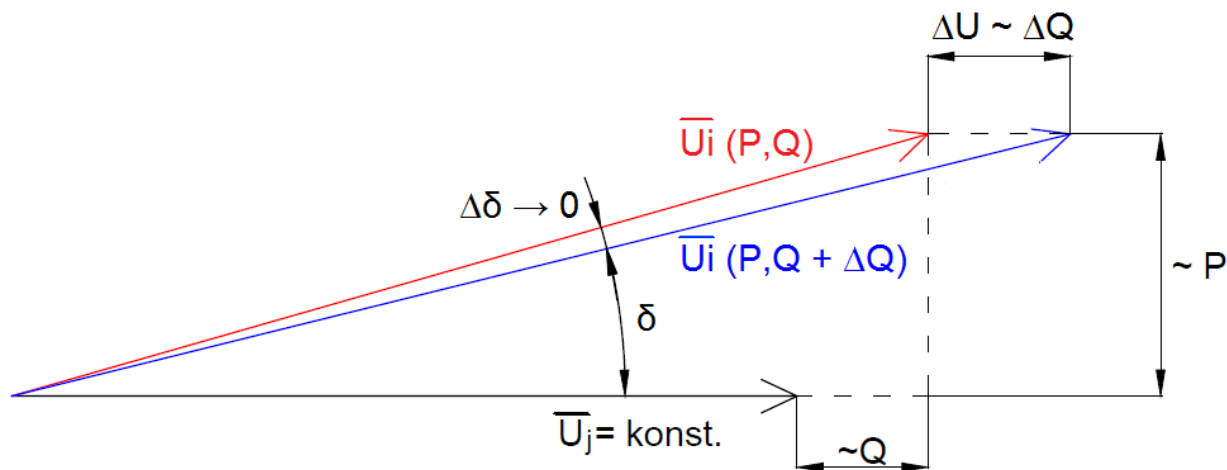
Obr. 2-4: Jednoduchý přenos s podélnou reaktancí

Na Obr. 2-5 jsou vykresleny napěťové poměry při odběru výkonů z uzlu j o velikosti P , Q a dále při změně činného odběru v uzlu j o ΔP při stálém odebíraném výkonu Q . Je-li napětí U_j udržováno na konstantní hodnotě, pak se při změně činného odběru na hodnotu $(P+\Delta P)$ absolutní hodnota napětí v uzlu i prakticky nezmění, avšak výrazně se změní úhel mezi původním napětím o $\Delta\delta$, což je v souladu s první rovnicí (2.40), tedy $\Delta P \sim \Delta\delta$.



Obr. 2-5: Fázorový diagram změny činného odebíraného výkonu

Na Obr. 2-6 jsou nakresleny napěťové poměry při změně jalového výkonu v uzlu j o ΔQ a konstantním činném odběru P . Je zde vidět, že změna jalového výkonu má podstatný vliv na změnu absolutní hodnoty napětí v uzlu i při $U_j = \text{konst.}$ a zanedbatelný vliv na změnu úhlu $\Delta\delta$, což je opět v souladu s druhou rovnicí (2.40), tedy $\Delta Q \sim \Delta U$.



Obr. 2-6: Fázorový diagram změny jalového odebíraného výkonu

Newtonova iterační metoda velmi rychle konverguje, obvyklý potřebný počet iterací závisí na zadané přesnosti ε , na velikosti sítě je jen málo závislý. Nevýhodou této metody je poměrně složitý a zdlouhavý výpočet jedné iterace.

Text kapitoly byl vytvořen podle [2].

3 PŘECHODNÉ JEvy V ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ

Ustáleným provozním stavem ES rozumíme takový stav, při kterém nastane rovnováha všech veličin určujících její chod. V ustáleném stavu neexistují přechodné s časem zanikající složky veličin chodu sítě. Ve skutečnosti ale takový stav nemůže nikdy nastat. Vlivem neustálých změn zatížení a výkonů zdrojů nepřetržitě dochází k pomalým změnám veličin chodu sítě. Tyto změny se vyznačují aperiodickým přechodem elektrizační soustavy do nového ustáleného stavu.

Příčinou přechodného stavu soustavy jsou nenormální jevy vznikající při provozu přímo v hlavním obvodu v důsledku náhlého porušení izolace (vlivem stárnutí, úderu blesku apod.) nebo ovládáním soustavy (chybná ruční či automatická manipulace s vypínacími prvky). Důsledkem těchto jevů je přechodný stav soustavy, ve kterém přechodné složky veličin chodu elektrizační soustavy nejčastěji zanikají formou tlumených kmitů a soustava tak přechází do nového ustáleného stavu. Z hlediska rozdělení přechodných jevů v ES je významné srovnání doby trvání zániku přechodných složek veličin chodu a jejich periody s periodou proudu se jmenovitou frekvencí. Přechodné děje rozdělujeme na:

1. **Pomalé – elektromechanické.** U těchto jevů je perioda přechodných složek tak velká, že se v přechodném ději uplatňují i setrvačné hmoty velkých rotačních zdrojů a spotřebičů soustavy. V elektrické části soustavy je vzhledem k délce periody použito náhrady pomocí soustředěných parametrů.
2. **Středně rychlé – elektromagnetické.** U středně rychlých jevů je perioda přechodných složek srovnatelná s periodou proudu se jmenovitou frekvencí. Vliv setrvačných hmot rotačních strojů se zanedbává a elektrická část soustavy se řeší pomocí soustředěných parametrů.
3. **Rychlé přechodné jevy.** Tyto jevy mají periodu přechodných složek výrazně kratší než je perioda jmenovitého kmitočtu proudu. Vliv setrvačných hmot rotačních strojů je rovněž zanedbatelný a elektrická část se řeší náhradními obvody s rovnoměrně rozloženými parametry.

Do první skupiny přechodných jevů patří děje související s náhlou změnou zatížení zdrojů, při kterém vzniká nerovnováha mezi elektrickým a mechanickým momentem na hřídeli generátorů ohrožující synchronní chod. Příčinou těchto přechodných jevů jsou změny ve spojení sítě uskutečňované obsluhou nebo automatikami vlivem provozních požadavků. Dále mohou být vyvolány porušením izolace v důsledku stárnutí nebo nepředpokládaného přepětí (úder blesku) apod.

Příčinou elektromagnetického přechodného jevu je zkratová porucha, tedy náhlá změna izolačního odporu mezi fázovými vodiči, případně mezi fázovým vodičem a zemí.

Nejrychlejší přechodné jevy jsou vyvolány spínacími pochody nebo úderem blesku do některého z prvku elektrizační soustavy nebo do jejich těsné blízkosti.

Toto rozdělení přechodných jevů podle doby trvání periody přechodných složek veličin chodu má význam jen z hlediska výpočtu – možnosti zjednodušení matematického modelu děje. Dělení postrádá smysl z hlediska vzniku přechodného jevu, protože jedna příčina může mít

za následek všechny tři přechodné jevy – úder blesku do vedení vyvolá velké přepětí, následnou zkratovou poruchu a elektromechanický děj.

Text kapitoly byl vytvořen podle [1].

3.1 Zkrat

Zkrat je elektromagnetický přechodný jev, který může být definován jako náhodné nebo úmyslné spojení přes malou impedanci dvou nebo více bodů v obvodu (vodivé spojení fází, spojení fáze se zemí), které mají při provozu různá napětí. Při zkratu protékají obvodem zkratové proudy, které mohou v blízkosti místa zkratu několikanásobně převýšit běžný provozní proud. To má za následek odpojení zkratované části obvodu od zdroje.

S přirozeným růstem spotřeby elektrické energie, se zvyšováním výkonů elektráren a s rozšiřováním elektrických sítí všech napěťových hladin rostou i zkratové proudy ve všech částech elektrického rozvodu. Vývoj velikosti zkratových proudů ovlivňuje parametry rozvodné soustavy, konstrukci elektroenergetických výrobků a vyžaduje soustavné sledování provozu. Pro projektování a provoz ES se problematika zkratových proudů neřeší jen pro současnost ale i pro budoucí situaci. Tato okolnost se vyřeší použitím zařízení s větší zkratovou odolností, než je potřebná.

Doba trvání zkratu závisí na druhu ochrany nebo automatiky, která je určená pro přerušení zkratového proudu. Nejrychleji vypínají zkrat pojistky nebo jističe s magnetickým vypínáním oblouku. U těchto případů čas vypnutí závisí na velikosti zkratového proudu, je však menší než 0,1 s. U ostatních vypínacích zařízení a automatik je doba vypnutí větší než 0,2 s a může být i několik sekund. Vypínací automatiky mohou mít dobu vypnutí nezávislou na velikosti proudu, této možnosti se využívá pro odpojení nejmenší části ES při zkratu.

Text kapitoly byl vytvořen podle [1], [3].

3.1.1 Příčiny vzniku zkratu

- **Vady zařízení** – zkrat vznikne nedokonalou izolací, která může být způsobena výrobou (nevhodné materiály, použitá technologie apod.) či špatnou montáží (nepředpisové uložení kabelů atd.). Patří sem také poruchy z důvodu zhoršení kvality izolace způsobené dlouhodobým přetěžováním, jenž vede k jejímu zrychlenému stárnutí.
- **Přepětí** – zkrat vznikne porušením izolace při atmosférickém nebo i provozním přepětí.
- **Cizí zásahy** – jedná se o velmi častou příčinu vzniku zkratové poruchy (překopnutí kabelu při výkopových pracích, pády stromů do venkovního vedení apod.).
- **Vlivem selhání lidského činitele** – zkrat je způsoben chybnou manipulací elektrických zařízení (vypnutí přípojnicového odpojovače při zatížení, zapomenutí cizích předmětů v zařízení apod.).

Text kapitoly byl vytvořen podle [3].

3.1.2 Nebezpečné děje při zkratu

- **Tepelné působení** – působením zkratového proudu stárne izolace kabelu, dále dochází ke zmenšení mechanické pevnosti vodičů, narušení mechanické pevnosti spojů. Zvláště nebezpečné je tepelné působení elektrického oblouku, které může způsobit požár.
- **Mechanické působení** – při zkratu vznikají vlivem elektromagnetického působení zkratového proudu mechanické síly, které způsobují ve formě dynamického rázu těžké mechanické namáhání všech částí elektrického systému – ohýbání pevných vodičů, roztržení podpěrných izolátorů apod.
- **Pokles napětí** – úbytky napětí rostou od místa zdrojů k místu zkratu. Pokles napětí se tedy projeví různou měrou v celé ES. Pokles napětí v přenosové soustavě ohrožuje stabilitu chodu celé ES, dále se nepříznivě projeví na funkci elektrických spotřebičů např.: u asynchronních motorů prudce klesá točivý moment, u světelných zdrojů dojde ke snížení světelného toku nebo ke zhasnutí (zářivky, výbojky).
- **Přepětí** – vzniká při vypínání zkratových proudů, může dosahovat až dvojnásobku jmenovitého napětí. Dále je potřeba věnovat pozornost zotavenému napětí po rozeznutí vypínače. Toto napětí může svojí strmostí narušit izolaci zařízení, ale také vypínací proces ve vypínači opětovným přeskokem vypínací dráhy a opětovným zapálením oblouku mezi jeho kontakty, který může způsobit havárii vypínače.

Text kapitoly byl vytvořen podle [3].

3.1.3 Rozdělení zkratů

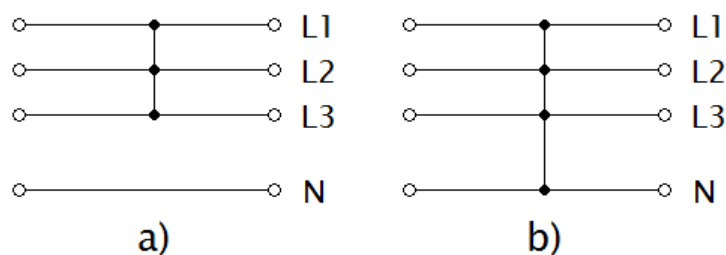
Podle přechodového odporu v místě poruchy rozeznáváme zkraty:

1. **Zkraty dokonalé (kovové)** – porucha se zanedbatelným odporem (dokonalý styk kovových vodičů).
2. **Zkraty nedokonalé** – porucha s hořícím obloukem nebo jinak nedokonalým stykem vodičů, které ohrožuje místo poruchy požárem.

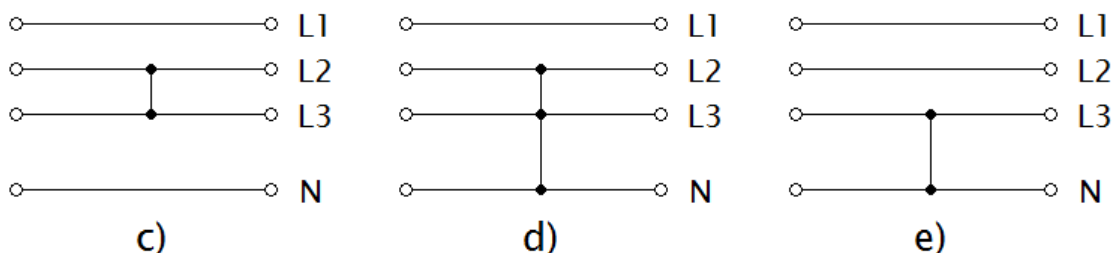
Dokonalé zkraty mají největší tepelné a silové účinky na prvky ES. Nelze je vyloučit a jsou tak při dimenzování rozhodující.

Podle způsobu zatěžování třífázové soustavy zkraty rozdělujeme:

- I. **Zkraty souměrné** (Obr. 3-1)
 - a) Třífázové
 - b) Třífázové zemní
- II. **Zkraty nesouměrné** (Obr. 3-2)
 - c) Dvoufázové
 - d) Dvoufázové zemní
 - e) Jednofázové



Obr. 3-1: Souměrné zkraty



Obr. 3-2: Nesouměrné zkraty

U venkovních vedení je pravděpodobnost výskytu jednofázového zkratu přes 90%. U kabelových vedení se vyskytují převážně zkraty třífázové a třífázové zemní. Většina nesouměrných zkratových poruch, které se vyskytnou u kabelů, se vlivem propálení izolace v místě poruchy změni na souměrný zkrat. Silové a tepelné účinky zkratového proudu mohou být u dokonalých nesouměrných poruch větší než u souměrných (téměř vždy platí u sítí VVN a ZVN).

Tab. 3-1: Pravděpodobnost výskytu jednotlivých zkratů v síti [3]

Druh zkratu	Relativní pravděpodobnost výskytu [%]		
	VN	110 kV	220 kV
Trojfázový	5	0,4	0,9
Dvoufázový	10	4,8	0,6
Dvoufázový zemní	20	3,8	5,4
Jednofázový	65	91	93,1

Text kapitoly byl vytvořen podle [1], [3].

3.2 Časový průběh zkratového proudu

Náhlou změnou impedance na svorkách zdrojů při zkratu vznikne přechodný děj ve všech prvcích ES. Velkým zkratovým proudem se poruší rovnováha mezi magnetickým a elektrickým polem v prostoru elektrizační soustavy. Následkem tohoto nerovnovážného stavu přechází soustava pomocí přechodných s časem zanikajících složek proudu a napětí do nového rovnovážného stavu.

Časový průběh napětí a proudu se obvykle zjednodušuje zanedbáním příčné admitance prvků soustavy včetně odběrů. Tímto se vyloučí vliv elektrického pole a přechodné složky proudu, napětí mají frekvenci zdrojů nebo jsou aperiodické. Rozložení energie magnetického pole v náhradním obvodu bez příčných admitancí a odběrů se oproti stavu před zkratem změní. Tato změna je po dobu trvající zkratové poruchy spojitá. Při stálém buzení synchronních generátorů zkratového proudu se vlivem reakce kotvy zmenšuje energie magnetického pole.

Energie v dalších pasivních prvcích ES se zvětšuje v důsledku zvyšujícího se proudu. V náhradním obvodu se s pomocí přechodných složek proudu přemění přebytek energie magnetických polí ve zdrojích do ostatních prvků náhradního obvodu. Pokud by nedošlo k přerušení zkratového proudu, tak by přechodný děj trval až do zániku přechodných složek a vzniku nového rovnovážného stavu se stejnou celkovou hodnotou energie magnetického pole v prvcích náhradního obvodu s rozložením, které by odpovídalo ustálenému zkratovému proudu.

Při těchto zjednodušujících předpokladech (stálé buzení, prvky ES pouze s příčnou impedancí induktivního charakteru) je hodnota zkratového proudu neharmonickou funkcí času se třemi přechodnými složkami, které exponenciálně zanikají.

$$i_k = \sqrt{2} \left\{ \left[\left(I_k'' - I_k' \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_d''}} + \left(I_k' - I_k \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_d'}} + I_k \right] \cdot \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) - I_k'' \cdot e^{-\frac{t}{\tau_s}} \cdot \sin(\alpha - \varphi_k) \right\} = i_{ks} + i_{ka} \quad (3.1)$$

kde:

α je počáteční fáze fázoru napětí v okamžiku vzniku zkratu ($t=0$), který je mírou okamžité hodnoty napětí u_0 na začátku poruchy

$$u_0 = \sqrt{2}U \cdot \sin(\omega t + \alpha) \Big|_{t=0} = \sqrt{2}U \cdot \sin \alpha \quad (3.2)$$

φ_k je úhel impedance mezi působišťem vnitřního napětí zdroje a místem poruchy

I_k'' je počáteční efektivní hodnota subtranzitního zkratového proudu neboli počáteční rázový zkratový proud

I_k' je počáteční efektivní hodnota tranzitního zkratového proudu

I_k je efektivní hodnota ustáleného zkratového proudu

τ_d'', τ_d' jsou subtranzitní a tranzitní časová konstanta subtranzitní a tranzitní složky zkratového proudu

i_{ks} je okamžitá hodnota střídavého (souměrného) zkratového proudu

i_{ka} je okamžitá hodnota stejnosměrné (aperiodické) složky zkratového proudu

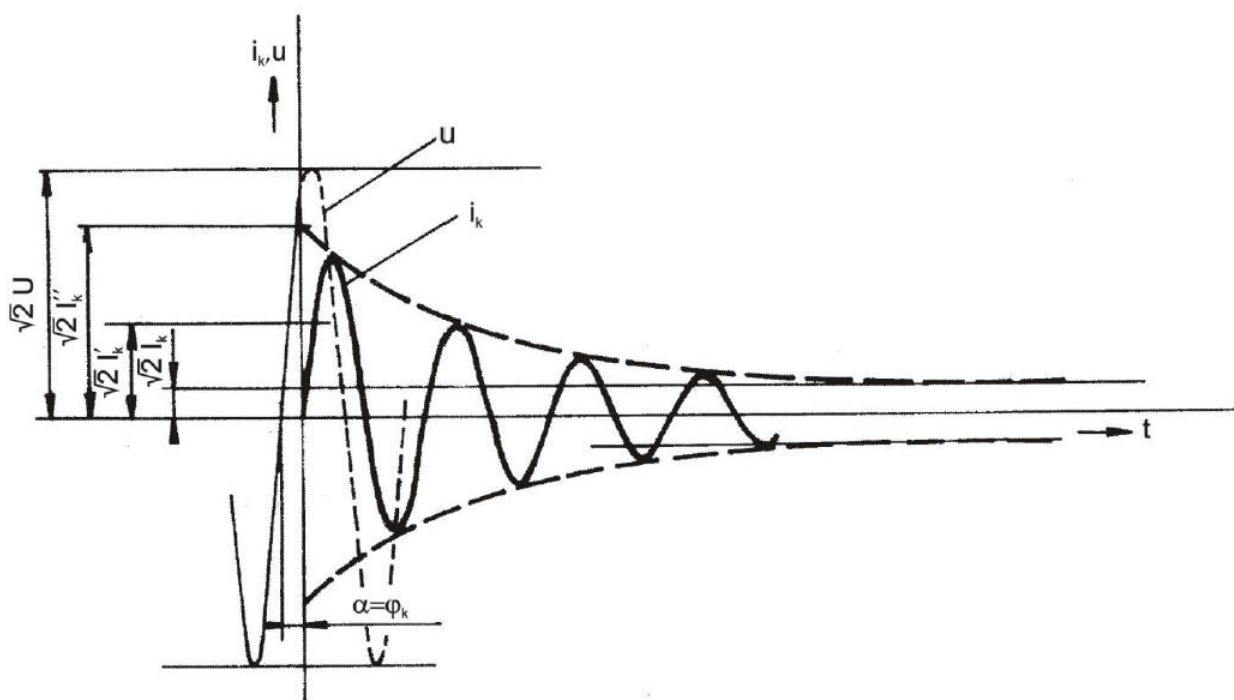
Z rovnice (3.1) je vidět, že velikost zkreslení střídavého zkratového proudu stejnosměrnou složkou je závislé na okamžité hodnotě napětí v okamžiku vzniku zkratu, tj. na úhlu α . Stejnosečná složka nevznikne a zkratový proud bude souměrný pouze v té fázi, kde platí:

$$\alpha - \varphi_k = 0, \quad \alpha = \varphi_k \quad (3.3)$$

Počáteční fáze fázoru napětí v okamžiku zkratu ($t = 0$) musí být shodná s úhlem zkratové impedance. V takovém případě bude pro časový průběh okamžité hodnoty zkratového proudu platit vztah (3.4), jehož grafický průběh je znázorněn na Obr. 3-3.

$$i_k = \sqrt{2} \left[(I_k'' - I_k') \cdot e^{-\frac{t}{\tau_d''}} + (I_k' - I_k) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_d'}} + I_k \right] \cdot \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) \quad (3.4)$$

Za předpokladu, že zkrat vznikl při chodu naprázdno, je počáteční hodnota zkratového proudu nulová. Kdyby nedošlo k přerušení proudu jisticím zařízením, zkratový proud by se ustálil na harmonickém průběhu s amplitudou $\sqrt{2}I_k$.



Obr. 3-3: Průběh souměrného zkratového proudu [1]

Největší stejnosměrná složka se bude nacházet ve fázi, ve které je v okamžiku vzniku zkratu počáteční úhel fázoru napětí roven

$$\alpha = \varphi_k - \frac{\pi}{2} \quad (3.5)$$

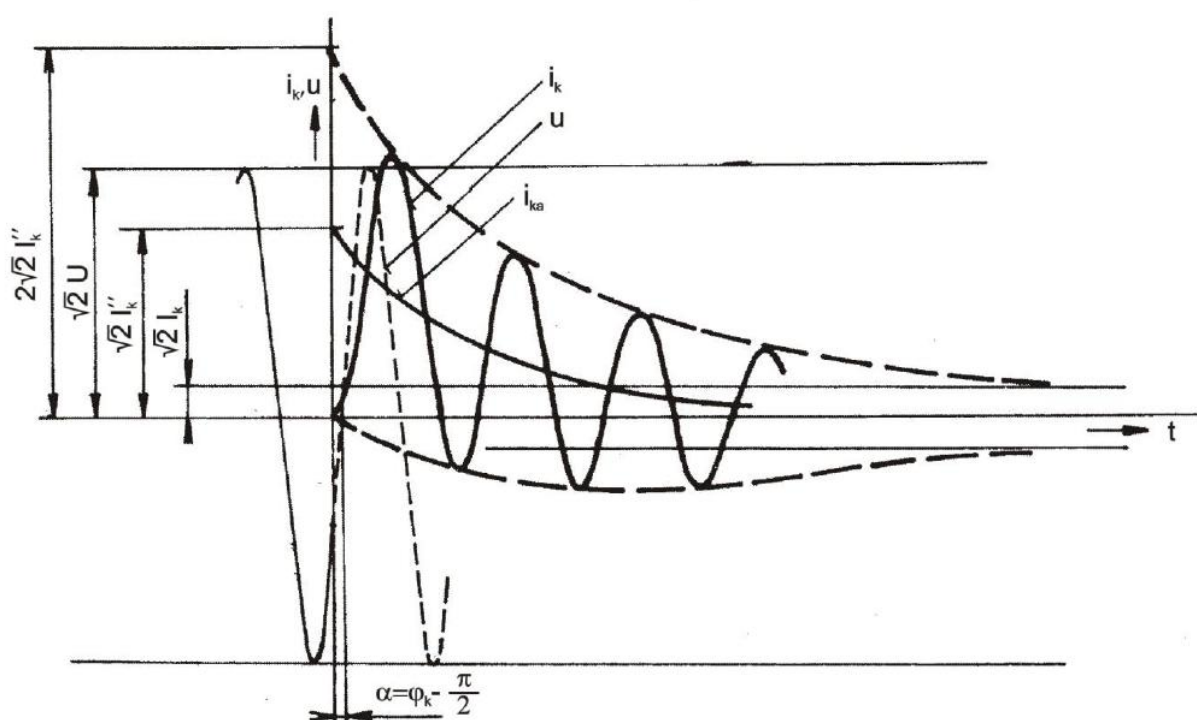
Vznikne-li zkratová porucha v okamžiku, kdy napětí nabývá hodnoty

$$u_0 = \sqrt{2}U \cdot \sin\left(\varphi_k - \frac{\pi}{2}\right) \quad (3.6)$$

tak bude střídavý proud maximálně zkreslen stejnosměrnou složkou a bude platit

$$i_k = \sqrt{2} \left\{ I_k'' \cdot e^{-\frac{t}{\tau_s}} - \left[(I_k'' - I_k') \cdot e^{-\frac{t}{\tau_d''}} + (I_k' - I_k) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_d'}} + I_k \right] \cdot \cos(\omega t) \right\} \quad (3.7)$$

Při úpravě vztahu (3.1) na (3.7) bylo použito: $\sin(-\pi/2) = -1$, $\sin(\omega t - \pi/2) = -\cos(\omega t)$. Průběh zkratového proudu podle rovnice (3.7) ukazuje Obr. 3-4. První amplituda dosáhne v tomto případě téměř dvojnásobek amplitudy střídavého zkratového proudu. Silové namáhání zařízení při zkratu se uvažuje pro tento okamžik vzniku zkratové poruchy. Totéž platí i pro tepelné účinky. Při dimenzování se uvažuje zkrat vzniklý v tomto nejnepříznivějším okamžiku.



Obr. 3-4: Průběh zkratového proudu s maximální stejnosměrnou složkou [1]

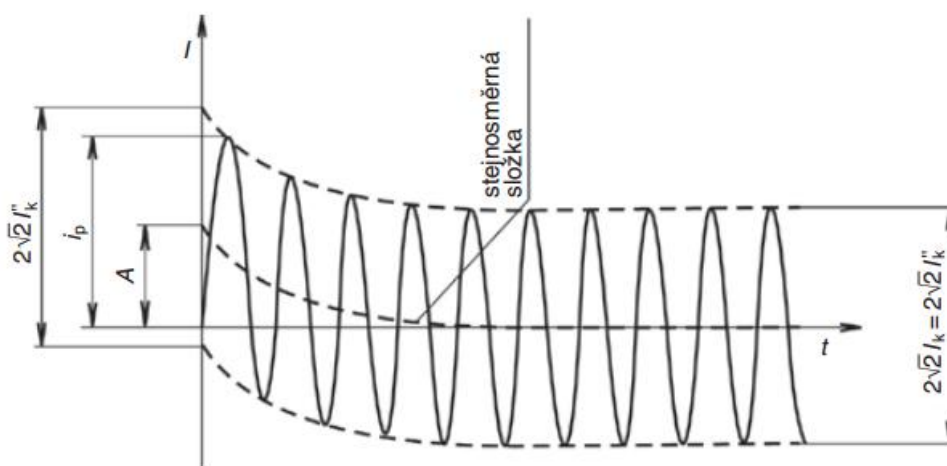
Časové konstanty exponenciálně zanikajících složek τ_d'' , τ_d' , τ_s jsou závislé na parametrech zdrojů (synchronních strojů v síti) a na rezistenci a indukčnosti vnějšího obvodu zkratového proudu (část obvodu mimo zdroje). Tranzitní časová konstanta synchronních strojů bývá v rozmezí 0,04 s až 1,8 s, podle jejich provedení a velikosti a s impedancí vnějšího zkratového obvodu roste. Časové konstanty subtranzitní a stejnosměrné složky jsou několikanásobně menší a jsou téměř nezávislé na vnější impedanci zkratového obvodu. Ubývání zkratového proudu u zkratové poruchy vzdálené od zdrojů je pomalejší a v některých případech zanedbatelné.

Text kapitoly byl vytvořen podle [1], [4].

3.3 Zkrat elektricky blízký a vzdálený

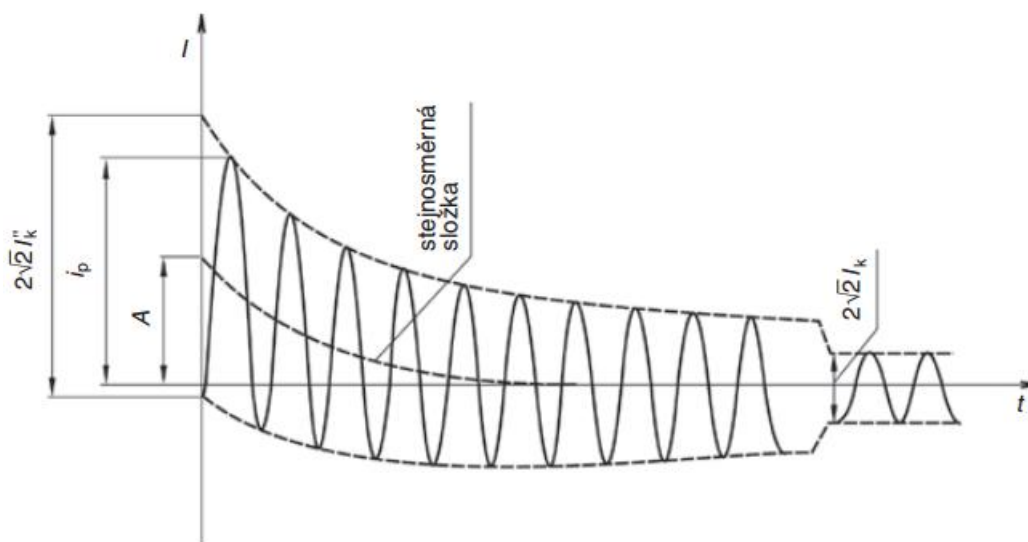
Podle změny souměrné složky zkratového proudu se rozlišují dva druhy zkratů a to zkrat elektricky blízký a zkrat elektricky vzdálený.

- **Zkrat elektricky vzdálený** – při tomto zkratu lze zanedbat příspěvky od synchronních a asynchronních strojů pracujících v soustavě. Souměrná složka zkratového proudu je od vzniku až do vypnutí zkratu konstantní. Tento typ zkratu se uvažuje u zkratů dostatečně elektricky vzdálených od zdrojů zkratového proudu a v sítích, kde je podíl zkratového proudu od asynchronních motorů do 5%.



Obr. 3-5: Elektricky vzdálený zkrat [5]

- **Zkrat elektricky blízký** – při tomto zkratu nelze zanedbat příspěvky od synchronních a asynchronních strojů. Souměrná složka zkratového proudu není konstantní, ale z počátku má větší velikost o příspěvky ze strojů a následně přechází v ustálenou hodnotu zkratového proudu.



Obr. 3-6: Elektricky blízký zkrat [5]

Text kapitoly byl vytvořen podle [5], [6].

3.4 Charakteristické hodnoty zkratového proudu

K dimenzování elektrických zařízení a nastavení ochran není nutné znát celý průběh zkratového proudu, ale pouze jeho charakteristické hodnoty:

- Počáteční rázový zkratový proud I_k''
- Nárazový zkratový proud I_p
- Vypínací zkratový proud I_b
- Stejnoseměrná složka vypínacího zkratového proudu $I_{d.c.}$
- Ekvivalentní oteplovací proud I_{th}
- Ustálený zkratový proud I_k
- Doba trvání zkratu t_k

Počáteční rázový zkratový proud I_k'' je efektivní hodnota střídavé souměrné složky zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu.

$$I_k'' = k_1 \cdot \frac{c \cdot U_v}{\sqrt{3} |\overline{Z_k}|} \quad (3.8)$$

kde

k_1 je součinitel reprezentující různé druhy zkratů v normě (pro třífázový zkrat je $k_1 = 1$).

U_v je vztažné sdružené napětí, na které je přepočten zkratový obvod.

$\overline{Z_k}$ je celková výpočtová impedance, jejíž určení je pro různé druhy zkratů uvedeno v normě. Obecně ji tvoří impedance sousledná, zpětná a netočivá.

c je napěťový součinitel, který zahrnuje odhad vnitřního napětí zdrojů za jejich subtranzitními reaktancemi v okamžiku vzniku zkratu.

Nárazový zkratový proud I_p je nejvyšší vrcholová hodnota zkratového proudu, která nastane v prvním maximu v čase $t = 0,01$ s po vzniku zkratu. Využívá se ke kontrole silových účinků zkratového proudu, jelikož silové účinky jsou největší v okamžiku, kdy zkratový proud dosáhne své první amplitudy. V praktických výpočtech se nárazový zkratový proud určuje z počátečního rázového zkratového proudu podle vztahu

$$I_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' \quad (3.9)$$

kde κ je součinitel reprezentující poměr R/X nebo X/R a určí se pomocí rovnice

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-\frac{3R}{X}} \quad (3.10)$$

Symetrický vypínací zkratový proud I_b je definován, jako efektivní hodnota střídavého zkratového proudu v čase vypnutí zkratu t_k . V souladu s rovnicí (3.7) je tedy:

$$I_b = \left(I_k'' - I_k' \right) \cdot e^{-\frac{t_k}{\tau_d}} + \left(I_k' - I_k \right) \cdot e^{-\frac{t_k}{\tau_d}} + I_k \quad (3.11)$$

Využívá se společně se stejnosměrnou složkou vypínacího zkratového proudu ke kontrole vhodné volby vypínačů a jističích zařízení. Jedná-li se o zkrat elektricky vzdálený, je možné dle normy uvažovat, že vypínací zkratový proud je roven počátečnímu rázovému zkratovému proudu.

$$I_b = I_k'' \quad (3.12)$$

Stejnoseměrná složka vypínacího zkratového proudu $I_{d.c.}$ je střední hodnota horní a dolní obalové křivky průběhu zkratového proudu v čase vypnutí zkratu t_k a podle rovnice (3.7) je dána vztahem

$$I_{d.c.} = \sqrt{2} \cdot I_k'' \cdot e^{-2\pi f \frac{t}{\tau_s}} \quad (3.13)$$

Ekvivalentní oteplovací proud I_{th} je efektivní hodnota fiktivního proudu harmonického průběhu, který za dobu trvání zkratu t_k , vyvine při průchodu rezistencí R stejné množství tepla Q jako časově proměnný zkratový proud s největší možnou aperiodickou složkou.

$$Q = R \int_0^{t_k} i_k^2(t) dt = R \cdot I_{th}^2 \cdot t_k \quad (3.14)$$

z toho vychází

$$I_{th} = \sqrt{\frac{1}{t_k} \int_0^{t_k} i_k^2(t) dt} \quad (3.15)$$

Ekvivalentního oteplovacího proudu se využívá při kontrole tepelných účinků zkratového proudu. V praxi se výpočtem určuje z počátečního rázového zkratového proudu I_k'' pomocí koeficientů m a n následovně

$$I_{th} = I_k'' \cdot \sqrt{m + n} \quad (3.16)$$

kde

- m představuje součinitel tepelných účinků stejnosměrné složky zkratového proudu
- n představuje součinitel tepelných účinků střídavé složky zkratového proudu

Koeficienty se určí podle normy ČSN EN 60909-0 [6].

Ustálený zkratový proud I_k je efektivní hodnota souměrného zkratového proudu, který protéká obvodem po odeznění přechodného jevu.

Doba trvání zkratu t_k je doba od počátku vzniku zkratu až do okamžiku, kdy se oddělí kontakty posledního pólu vypínacího zařízení.

Text kapitoly byl vytvořen podle [1], [6].

4 VÝPOČET ZKRATŮ

Velikost zkratového proudu v jakémkoli místě elektrizační soustavy závisí na druhu zkratu, konfiguraci sítě, zdrojů zkratového proudu (generátorů, motorů) a na stavu sítě před poruchou (chod naprázdno, zatížená síť).

4.1 Postup výpočtu

1. Sestaví se základní schéma zapojení jednotlivých prvků a uvedou se všechny parametry a napěťové hladiny. Následně se vyberou místa, v nichž se budou počítat zkraty. Zvolí se vztažný výkon a vztažné napětí (obvykle se volí napětí v místě zkratu).
2. Vypočítají se zkratové impedance jednotlivých prvků a přepočítají se do místa zkratu. Z těchto impedancí se vytvoří náhradní obvod. Pro výpočet třífázového zkratu se sestaví schéma pouze ze souměrných impedancí, v případě nesouměrných poruch je potřeba sestavit i schéma zpětné a nulové.
3. Náhradní obvod se zjednoduší na jednu impedanci do místa zkratu.
4. Vypočítá se počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k'' jdoucí do poruchy.
5. Mohou se vypočítat příspěvky jednotlivých zdrojů zkratového proudu (synchronní stroje a asynchronní motory).
6. Určí se potřebné parametry zkratového proudu (I_p , I_{th} atd.).

Text kapitoly byl vytvořen podle [3].

4.2 Metoda ekvivalentního napěťového zdroje

Norma ČSN-EN 60909-0 [6] uvádí metodu výpočtu ekvivalentního napěťového zdroje, která se užívá pro výpočet zkratových proudů.

Tato metoda vychází z toho, že v soustavě je jediný aktivní zdroj napětí. Všechny ostatní napájecí zdroje v síti (generátory, motory) jsou nahrazeny jejich vnitřními rázovými reaktancemi. Všechny paralelní kapacity a admitance (zátěže) kromě kapacit a admitancí motorů se v sousledné a zpětné složce zanedbávají. Kapacity se v netočivém schématu musí brát v úvahu (zanedbávají se pouze v NN soustavách a v soustavě VN účinně uzemněné). Pro potřeby výpočtu byl zaveden napěťový součinitel c , který udává napěťový poměr mezi napětím ekvivalentního zdroje a jmenovitým napětím sítě U_n poděleným $\sqrt{3}$.

$$E = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}} \quad (4.1)$$

Výpočet se může provádět:

- Ve skutečných hodnotách – celý výpočet probíhá ve skutečných fyzikálních jednotkách, veličiny se značí velkými písmeny.
- V poměrných hodnotách – výpočet probíhá v poměrných hodnotách. Prvky se přepočítají pomocí vztažných hodnot (U_v , S_v). Veličiny se značí malými písmeny.

Výpočtem se určují dva různé zkratové proudy, které se liší svou velikostí:

- Maximální zkratový proud – proud, podle kterého se určuje zkratová odolnost zařízení a vypínací schopnost vypínačů atd.
- Minimální zkratový proud – proud, který se používá k volbě pojistek, nastavení ochran, pro kontrolu rozběhu motorů apod.

Text kapitoly byl vytvořen podle [3].

4.2.1 Výpočet ve skutečných hodnotách

Obvod zkratového proudu téměř vždy obsahuje transformátory, a tím i více napěťových úrovní. Podélné reaktance prvků zkratového obvodu (generátorů transformátorů, vedení a dalších) se musí přepočítat na libovolnou vztažnou hladinu napětí U_v (většinou se volí napěťová hladina v místě zkratu). Přepočet se provádí pomocí převodu transformátorů mezi místem poruchy a přepočítávanou impedancí. Většinou však nejsou známy přesné převody transformátorů z důvodu odboček, a využívá se tak převod podle jmenovitých napětí sítě. Impedance se přepočítá pomocí druhé mocniny převodu mezi základním vztažným napětím a napětím přepočítávané impedance podle rovnice (4.2).

$$\overline{Z_{x,p}} = \overline{Z_x} \cdot \left(\frac{U_v}{U_{x,n}} \right)^2 \quad (4.2)$$

Text kapitoly byl vytvořen podle [1].

4.2.2 Výpočet v poměrných hodnotách

Základ poměrných hodnot je společný pro celý náhradní zkratový obvod. Vztažná hodnota napětí U_v se volí rovna jmenovité hodnotě napětí v místě zkratové poruchy, vztažný výkon S_v se volí libovolné velikosti. Všechny pojmenované veličiny náhradního obvodu se podělením příslušné hodnoty (U_v , I_v , Z_v , S_v) přepočítají na poměrné hodnoty. Pro stanovení poměrných hodnot náhradního obvodu se použijí následující rovnice.

Vztažný proud:

$$I_v = \frac{S_v}{\sqrt{3} \cdot U_v} \quad (4.3)$$

Vztažná impedance:

$$Z_v = \frac{U_v^2}{S_v} \quad (4.4)$$

Přepočet výkonu:

$$s = \frac{S}{S_v} \quad (4.5)$$

Přepočet napětí:

$$u = \frac{U}{U_v} \quad (4.6)$$

Přepočet proudu:

$$i = \frac{I}{I_v} \quad (4.7)$$

Text kapitoly byl vytvořen podle [1].

4.2.3 Zjednodušující předpoklady

S použitím polehčujících předpokladů zajišťují výpočty dostatečnou přesnost, i když jejich použitím neodpovídá uvažovaná elektrická soustava skutečnosti. Podle normy ČSN-EN 60909-0 [6] lze použít následující zjednodušující předpoklady:

- Po dobu trvání zkratové poruchy se nemění typ zkratu (trojfázový zkrat od vzniku až do vypnutí).
- Po dobu zkratu nedochází k žádné změně v síti.
- Impedance transformátorů se uvažují při přepínači odboček v základní poloze.
- Neuvažuje se odpor oblouku.
- Všechny kapacity vedení, paralelní admitance a netočivé statické zátěže se zanedbávají, kromě paralelních admitancí v netočivé soustavě.

Dále se zohledňují i tyto předpoklady:

- Zkrat nastal v jednom bodě elektrizační soustavy. Při vzniku vícefázového zkratu se předpokládá vznik zkratu současně.
- Předpokládá se kovový zkrat.
- Předpokládá se, že v okamžiku vzniku zkratu jsou všechna elektromotorická indukovaná napětí generátorů ve fázi a po přepočtu na poměrné hodnoty mají stejnou velikost.
- Magnetizační proud transformátoru se zanedbává.
- Za zdroje zkratového proudu, které přispívají do místa zkratu, se počítají synchronní motory, synchronní kompenzátory i asynchronní motory.
- Vliv zatížení se neuvažuje.
- Sériové kondenzátory se při zkratu uvažují pouze v případě, nejsou-li vyřazeny ochranou.
- Paralelní kondenzátory se neuvažují, přesáhne-li jejich reaktance dvacetinásobek induktivní reaktance zkratového obvodu. V opačném případě se respektuje jako reaktance se záporným znaménkem. Vybíjecí proud se neuvažuje.

Text kapitoly byl vytvořen podle [3], [6].

4.2.4 Výpočet maximálního zkratového proudu

Pro výpočet maximálních zkratových proudů je nutné zvolit tyto podmínky:

- Pro výpočet maximálních zkratových proudů je nutné použít napěťový součinitel c_{max} z Tab. 4-1.
- Zvolit konfiguraci soustavy a maximální příspěvky z elektráren a síťových napáječů tak, aby vedly k nejvyšší hodnotě zkratového proudu v daném místě zkratu nebo pro přijaté dělení sítě k omezení zkratového proudu.
- Je-li použita metoda ekvivalentního napěťového zdroje, tak musí být použita minimální ekvivalentní zkratová impedance, která odpovídá maximálnímu příspěvku zkratových proudů od síťových napáječů.
- Musí se počítat i s příspěvky motorů ke zkratovému proudu.
- Uvažují se rezistence vedení při teplotě 20 °C.

Text kapitoly byl vytvořen podle [3], [6].

4.2.5 Výpočet minimálního zkratového proudu

Pro výpočet minimálních zkratových proudů je nutné zvolit tyto podmínky:

- Pro výpočet minimálních zkratových proudů je nutné použít napěťový součinitel c_{min} z Tab. 4-1.
- Zvolit konfiguraci soustavy a minimální příspěvky z elektráren a síťových napáječů tak, aby vedly k nejnižší hodnotě zkratového proudu v daném místě zkratu.
- Příspěvky motorů ke zkratovému proudu musí být zanedbány.
- Rezistence vedení se uvažuje pro nejvyšší možnou teplotu.

Tab. 4-1: Napěťový součinitel c podle ČSN-EN 60909 [6]

Jmenovité napětí U_n	Napěťový součinitel c	
	maximální zkratové proudy $c_{max}^{1)}$	minimální zkratové proudy c_{min}
Nízké napětí 100 V – 1000 V	1,05 ³⁾ 1,04 ⁴⁾	0,95
Vysoké napětí 1 kV – 35 kV	1,10	1,00
Velmi vysoké napětí ²⁾ > 35 kV		
¹⁾ $c_{max}U_n$ by neměl překročit nejvyšší napětí U_m pro zařízení energetických soustav ²⁾ Pokud není jmenovité napětí definováno potom $c_{max}U_n$ nebo $c_{min}U_n \times U_m$ ³⁾ Pro soustavy nízkého napětí s tolerancí + 6 %, například soustavy přecházející z 380 V na 400V ⁴⁾ Pro soustavy nízkého napětí s tolerancí + 10 %		

Text kapitoly byl vytvořen podle [3], [6].

4.3 Výpočet zkratových impedancí prvků soustavy

Sousledná i zpětná zkratová impedance jsou si rovny u síťových napáječů, transformátorů, venkovních vedení, kabelů, reaktorů a podobných prvků sítě.

Netočivá zkratová impedance se určí ze střídavého napětí, které se uvažuje mezi třemi paralelními vodiči a společným zpětným vedením (zemí, nulovým vodičem, zemnicím vodičem, kabelovým pláštěm atd.). Společným vedením protéká trojnásobek proudu netočivé složky.

Zkratové impedance generátorů, transformátorů, motorů se násobí impedančními korekčními součiniteli, pokud se zkratové proudy počítají metodou ekvivalentního napětového zdroje.

Text kapitoly byl vytvořen podle [6].

4.3.1 Síťové napáječe

Je-li zkrat napájen ze sítě, v níž je zadán pouze počáteční souměrný rázový zkratový proud I_{kQ}'' , tak se ekvivalentní zkratová impedance sítě určí následovně:

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I_{kQ}''} \quad (4.8)$$

Je-li je znám poměr R_Q / X_Q , reaktance se vypočítá následovně:

$$X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_Q}{X_Q}\right)^2}} \quad (4.9)$$

Je-li zkrat napájen z transformátoru ze sítě VN, VVN nebo ZVN, kde je znám jen počáteční souměrný rázový zkratový proud I_{kQ}'' , ekvivalentní zkratová impedance vztažená na stranu nižšího napětí transformátoru se určí jako

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I_{kQ}''} \cdot \frac{1}{t_r} \quad (4.10)$$

kde

U_{nQ} je jmenovité napětí soustavy v bodě připojení napáječe

t_r je jmenovitý převod transformátoru s odbočkou v základní poloze.

Pokud má napáječ vyšší jmenovité napětí než 35 kV a je napájen z venkovních vedení, tak je možné ekvivalentní impedanci považovat za reaktanci, tj. $\overline{Z}_Q = 0 + jX_Q$. V jiných případech, není-li pro rezistence síťových napáječů známá žádná přesná hodnota, je možné dosadit $R_Q = 0,1X_Q$, kde $X_Q = 0,995Z_Q$.

Počáteční rázové zkratové proudy $I_{kQ \max}''$ a $I_{kQ \min}''$ na straně vyššího napětí transformátoru udává provozovatel přenosové (distribuční) soustavy, nebo se určí výpočtem.

Text kapitoly byl vytvořen podle [6].

4.3.2 Venkovní vedení a kabely

Sousledná zkratová impedance $\overline{Z}_L = R_L + jX_L$ se vypočítá z parametrů vodiče, jako jsou průřezy, materiál a rozteče vodičů.

Činná rezistence na jednotku délky R_L' venkovního vedení při teplotě 20°C se vypočítá ze jmenovitého průřezu S_n a rezistivity ρ :

$$R_L' = \frac{\rho}{S_n} \quad (4.11)$$

Rezistivita mědi: $\rho = 54^{-1} \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$

Rezistivita hliníku: $\rho = 34^{-1} \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$

Rezistivita slitiny hliníku: $\rho = 31^{-1} \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$

Rezistence pro teploty vyšší jak 20°C se počítá podle (4.12)

$$R_L = [1 + \alpha \cdot (\vartheta_e - 20^\circ\text{C})] \cdot R_{L\ 20^\circ\text{C}} \quad (4.12)$$

kde

α je teplotní součinitel elektrického odporu, který má pro měď, hliník a jeho slitiny velikost 0,004 K⁻¹

ϑ_e je teplota vodiče

$R_{L\ 20^\circ\text{C}}$ je rezistence při 20°C.

Reaktance na jednotku délky X_L' je pro venkovní vedení možné vypočítat za předpokladu, že vedení je transponované

$$X_L' = f \cdot \mu_0 \cdot \left(\frac{1}{4n} + \ln \frac{d}{r} \right) \quad (4.13)$$

kde

d je geometrická střední vzdálenost mezi vodiči nebo středem svazků

$$d = \sqrt[3]{d_{L1L2} \cdot d_{L2L3} \cdot d_{L3L1}}$$

r je poloměr jednoduchého vodiče. V případě svazkových vodičů se za r dosadí $r_B = \sqrt[n]{n \cdot r \cdot R^{n-1}}$, kde R je poloměr svazku

n je počet vodičů ve svazku, pro jednoduchý vodič je $n = 1$

μ_0 je permeabilita vakua $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$

Text kapitoly byl vytvořen podle [6].

4.3.3 Transformátory

Dvouvinut'ové transformátory

Souslednou zkratovou impedanci dvouvinut'ového transformátoru $\overline{Z}_T = R_T + jX_T$ s regulovatelnými odbočkami lze vypočítat ze jmenovitých hodnot následovně:

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad (4.14)$$

$$R_T = \frac{u_{Rr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2} \quad (4.15)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (4.16)$$

kde

U_{rT} je jmenovité napětí transformátoru na straně vyššího nebo nižšího napětí

I_{rT} je jmenovitý proud transformátoru na straně vyššího nebo nižšího napětí

S_{rT} je jmenovitý výkon transformátoru

P_{krT} jsou jmenovité ztráty transformátoru nakrátko

u_{kr} jmenovité napětí transformátoru nakrátko v procentech

u_{Rr} činná složka jmenovitého napětí nakrátko transformátoru v procentech

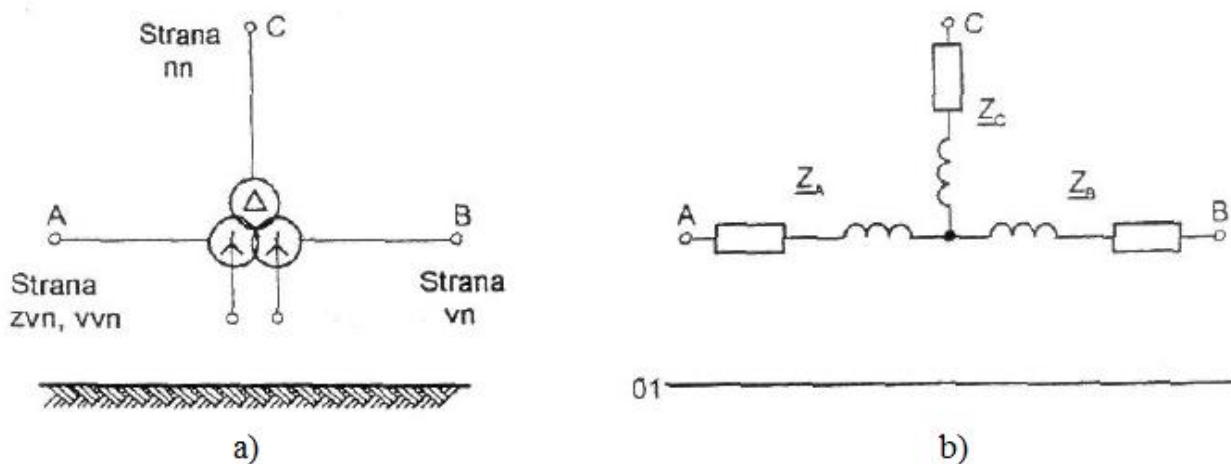
Činná složka u_{Rr} se může vypočítat ze ztrát nakrátko P_{krT} ve vinutí při jmenovitém proudu I_{rT} , kde obě hodnoty musí být ze stejné strany transformátoru.

Poměr rezistence a reaktance R_T/X_T obvykle roste s velikostí transformátoru. U velkých transformátorů je odpor velmi malý, takže je možné jej při výpočtu velikosti zkratového proudu zanedbat. Impedanci tím pádem bude představovat pouze reaktance. Odpor se uvažuje pouze tehdy, je-li potřeba vypočítat nárazový zkratový proud I_p nebo stejnosměrnou složku $I_{d.c.}$.

Potřebné údaje pro výpočet sousledné a zpětné impedance $\overline{Z}_T = R_T + jX_T = \overline{Z}_{T(1)} = \overline{Z}_{T(2)}$ lze najít na štítku transformátoru. Údaje o netočivé zkratové impedanci $\overline{Z}_{T(0)} = R_{T(0)} + jX_{T(0)}$ je možné také najít na štítku, popřípadě u výrobce.

Trojvinut'ové transformátory

Sousledné impedance trojvinut'ového transformátoru $\overline{Z}_A, \overline{Z}_B, \overline{Z}_C$ lze vypočítat pomocí tří zkratových impedancí (vztažených na stranu A transformátoru). Schéma trojvinut'ového transformátoru s označenými vinutími je na Obr. 4-1 a), náhradní schéma sousledné složkové soustavy je na Obr. 4-1 b).



Obr. 4-1: Trojvinut'ový transformátor [6]

$$\overline{Z_{AB}} = \left(\frac{u_{RrAB}}{100\%} + j \frac{u_{XrAB}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAB}} \quad (\text{strana C rozpojena}) \quad (4.17a)$$

$$\overline{Z_{AC}} = \left(\frac{u_{RrAC}}{100\%} + j \frac{u_{XrAC}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAC}} \quad (\text{strana B rozpojena}) \quad (4.17b)$$

$$\overline{Z_{BC}} = \left(\frac{u_{RrBC}}{100\%} + j \frac{u_{XrBC}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTBC}} \quad (\text{strana A rozpojena}) \quad (4.17c)$$

$$u_{Xr} = \sqrt{u_{kr}^2 - u_{Rr}^2} \quad (4.18)$$

Jednotlivé impedance:

$$\overline{Z_A} = \frac{1}{2} \cdot (\overline{Z_{AB}} + \overline{Z_{AC}} - \overline{Z_{BC}}) \quad (4.19a)$$

$$\overline{Z_B} = \frac{1}{2} \cdot (\overline{Z_{AB}} - \overline{Z_{AC}} + \overline{Z_{BC}}) \quad (4.19b)$$

$$\overline{Z_C} = \frac{1}{2} \cdot (-\overline{Z_{AB}} + \overline{Z_{AC}} + \overline{Z_{BC}}) \quad (4.19c)$$

kde

U_{rTA} je jmenovité napětí na straně A

S_{rTAB} je jmenovitý zdánlivý výkon mezi stranami A a B

S_{rTAC} je jmenovitý zdánlivý výkon mezi stranami A a C

S_{rTBC} je jmenovitý zdánlivý výkon mezi stranami B a C

u_{RrAB}, u_{XrAB} jsou jmenovité činné a jalové složky napětí nakrátko v procentech mezi stranami A a B

u_{RrAC}, u_{XrAC} jsou jmenovité činné a jalové složky napětí nakrátko v procentech mezi stranami A a C

u_{RrBC}, u_{XrBC} jsou jmenovité činné a jalové složky napětí nakrátko v procentech mezi stranami B a C

Informace o netočivých impedancích trojvinut'ového transformátoru lze získat u výrobce.

Korekční součinitelé zkratových impedancí dvou- a trojvinutových transformátorů

U dvouvinutových transformátorů s přepínačem odboček při zatížení i bez něj se musí zkratová impedance vynásobit korekčním součinitelem $\overline{Z}_{TK} = \overline{Z}_T \cdot K_T$, který se vypočítá

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_T} \quad (4.20)$$

kde x_T je poměrná reaktance transformátoru $x_T = X_T / (U_{rT}^2 / S_{rT})$ a c_{\max} odpovídá jmenovitému napětí sítě připojené na stranu nižšího napětí síťového transformátoru podle Tab. 4-1. Tento korekční koeficient se nesmí použít pro blokové transformátory, protože zkratové impedance bloku generátoru a transformátoru se počítají jinak, viz [6].

Jsou-li známy dlouhodobé provozní podmínky síťových transformátorů před zkratem, tak lze místo rovnice (4.20) použít rovnici (4.21):

$$K_T = \frac{U_n}{U^b} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x_T \cdot \frac{I_T^b}{I_{rT}} \cdot \sin \phi_T^b} \quad (4.21)$$

kde

U^b je nejvyšší provozní napětí před zkratem

I_T^b je nejvyšší provozní proud před zkratem

ϕ_T^b je fázový úhel před zkratem mezi napětím a proudem

Při výpočtu nesouměrných zkratových proudů se musí impedančním korekčním koeficientem vynásobit také zpětné a netočivé impedance transformátoru. Impedance \overline{Z}_N mezi uzlem transformátoru a zemí zahrnuje trojnásobek netočivé soustavy bez korekčního součinitele.

U trojvinutových transformátorů s přepínačem odboček při zatížení i bez něj se impedanční korekční koeficienty vypočítají použitím poměrných hodnot reaktancí transformátorů:

$$K_{TAB} = 0,95 \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_{TAB}} \quad (4.22a)$$

$$K_{TAC} = 0,95 \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_{TAC}} \quad (4.22b)$$

$$K_{TBC} = 0,95 \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_{TBC}} \quad (4.22c)$$

Po výpočtu impedancí $\overline{Z}_{AB}, \overline{Z}_{AC}, \overline{Z}_{BC}$ se vypočítají jejich korigované hodnoty $\overline{Z}_{KAB}, \overline{Z}_{KAC}, \overline{Z}_{KBC}$ a následně se vypočítají jednotlivé korigované impedance $\overline{Z}_{KA}, \overline{Z}_{KB}, \overline{Z}_{KC}$ podle rovnic (4.19). Impedanční korekční koeficienty se musí použít i pro zpětné a netočivé impedance. Mezi uzlem transformátoru a zemí se impedance určuje bez korekčního součinitele.

Text kapitoly byl vytvořen podle [6].

4.3.4 Synchronní generátory

Při výpočtu počátečního rázového zkratového proudu v soustavě napájené přímo z generátoru bez blokového transformátoru (např. průmyslové sítě, NN sítě) se používá (korigovaná) rázová impedance v sousledné soustavě, která se vypočítá jako

$$\overline{Z_{GK}} = K_G \cdot \overline{Z_G} = K_G \cdot (R_G + jX_d'') \quad (4.23)$$

kde korekční činitel je

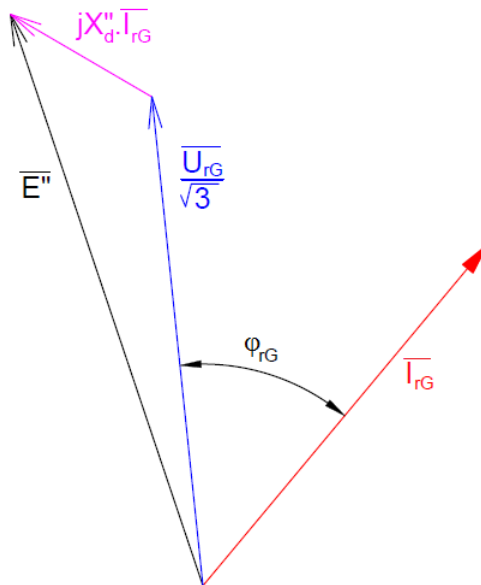
$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x_d'' \cdot \sin \varphi_{rG}} \quad (4.24)$$

kde

U_{rG} je jmenovité napětí generátoru

φ_{rG} je fázový úhel mezi jmenovitým proudem a napětím generátoru

x_d'' je poměrná rázová reaktance generátoru vztažená ke jmenovité impedanci



Obr. 4-2: Fázorový diagram generátoru v chodu se jmenovitými parametry

Při použití ekvivalentního napěťového zdroje $cU_n / \sqrt{3}$ místo rázového napětí $\overline{E''}$ generátoru se musí použít korekční koeficient K_G pro výpočet korigované impedance $\overline{Z_{GK}}$.

S dostatečnou přesností lze využít následující hodnoty pro fiktivní rezistence R_{Gf} :

$$R_{Gf} = 0,05 X_d'' \text{ pro generátory s } U_{rG} > 1 \text{ kV a } S_{rg} \geq 100 \text{ MVA}$$

$$R_{Gf} = 0,07 X_d'' \text{ pro generátory s } U_{rG} > 1 \text{ kV a } S_{rg} < 100 \text{ MVA}$$

$$R_{Gf} = 0,15 X_d'' \text{ pro generátory s } U_{rG} \leq 1000 \text{ V}$$

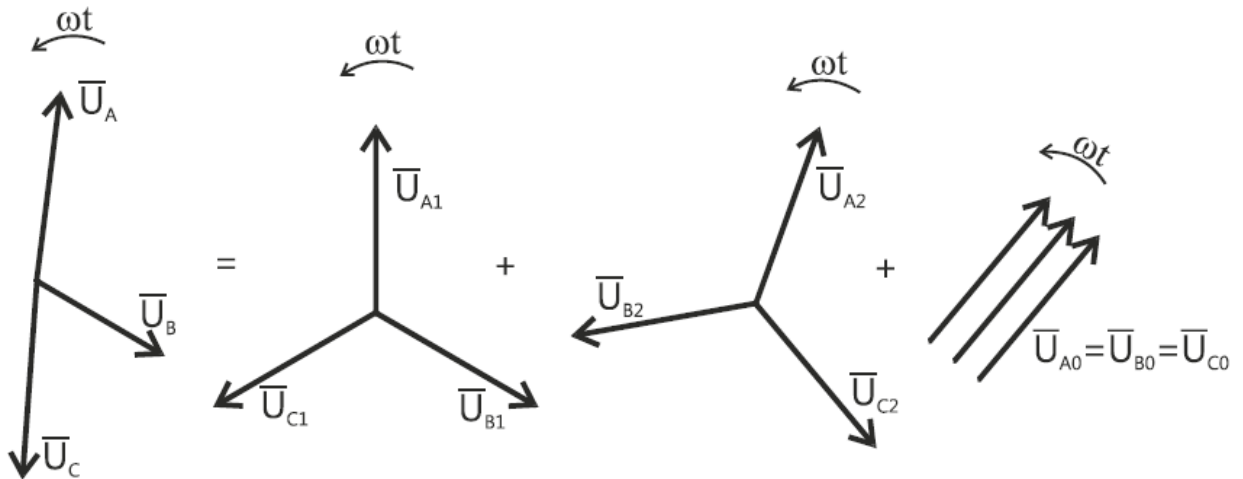
Kromě zanikající stejnosměrné složky respektují součinitelé 0,05, 0,07 a 0,15 také zanikání střídavé složky zkratového proudu v průběhu první půlperrody od vzniku zkratové poruchy. S vlivem různých teplot vinutí na R_{Gf} se neuvažuje.

Korekční součinitel z rovnice (4.24) se používá i pro korekci zpětné a nulové impedance. Jsou-li hodnoty X_d'' a X_q'' odlišné, lze použít pro výpočet zpětné reaktance jejich průměru $X_{G(2)} = (X_d'' + X_q'') / 2$. Uvažuje-li se zkratová impedance mezi uzlem generátoru a zemí, korekční součinitel se nepoužívá.

Text kapitoly byl vytvořen podle [6].

4.4 Zkrat v soustavě souměrných složek

Každá hvězdice nesymetrických fázorů lze v třífázové soustavě rozložit na symetrické fázory sousledné, zpětné a nulové složky. Sousedná soustava má shodný směr fází jako nesouměrná soustava, zpětná soustava má opačný sled fází. Nulovou soustavu tvoří tři stejné fázory.



Obr. 4-3: Rozložení nesymetrických fázorů na symetrické složky [3]

Nesymetrický fázor \overline{U}_A je složen ze sousledného fázoru $\overline{U}_{A(1)}$, zpětného fázoru $\overline{U}_{A(2)}$ a netočivého fázoru $\overline{U}_{A(0)}$.

$$\begin{aligned}\overline{U}_A &= \overline{U}_{A(1)} + \overline{U}_{A(2)} + \overline{U}_{A(0)} \\ \overline{U}_B &= \overline{U}_{B(1)} + \overline{U}_{B(2)} + \overline{U}_{B(0)} \\ \overline{U}_C &= \overline{U}_{C(1)} + \overline{U}_{C(2)} + \overline{U}_{C(0)}\end{aligned}\tag{4.25}$$

Pokud zvolíme jako referenční fázi A, tak rovnice (4.25) můžeme přepsat do tvaru:

$$\begin{aligned}\overline{U}_A &= \overline{U}_{(1)} + \overline{U}_{(2)} + \overline{U}_{(0)} \\ \overline{U}_B &= \overline{a}^2 \cdot \overline{U}_{(1)} + \overline{a} \cdot \overline{U}_{(2)} + \overline{U}_{(0)} \\ \overline{U}_C &= \overline{a} \cdot \overline{U}_{(1)} + \overline{a}^2 \cdot \overline{U}_{(2)} + \overline{U}_{(0)}\end{aligned}\tag{4.26}$$

Analogicky můžeme napsat rovnice pro proud

$$\begin{aligned}\overline{I_A} &= \overline{I_{(1)}} + \overline{I_{(2)}} + \overline{I_{(0)}} \\ \overline{I_B} &= \overline{a} \cdot \overline{I_{(1)}} + \overline{a}^2 \cdot \overline{I_{(2)}} + \overline{I_{(0)}} \\ \overline{I_C} &= \overline{a}^2 \cdot \overline{I_{(1)}} + \overline{a} \cdot \overline{I_{(2)}} + \overline{I_{(0)}}\end{aligned}\quad (4.27)$$

Pro zpětnou transformaci napětí a proudů platí

$$\begin{aligned}\overline{U_{(1)}} &= \frac{1}{3}(\overline{U_A} + \overline{a} \cdot \overline{U_B} + \overline{a}^2 \cdot \overline{U_C}) \\ \overline{U_{(2)}} &= \frac{1}{3}(\overline{U_A} + \overline{a}^2 \cdot \overline{U_B} + \overline{a} \cdot \overline{U_C})\end{aligned}\quad (4.28)$$

$$\begin{aligned}\overline{U_{(0)}} &= \frac{1}{3}(\overline{U_A} + \overline{U_B} + \overline{U_C}) \\ \overline{I_{(1)}} &= \frac{1}{3}(\overline{I_A} + \overline{a} \cdot \overline{I_B} + \overline{a}^2 \cdot \overline{I_C}) \\ \overline{I_{(2)}} &= \frac{1}{3}(\overline{I_A} + \overline{a}^2 \cdot \overline{I_B} + \overline{a} \cdot \overline{I_C}) \\ \overline{I_{(0)}} &= \frac{1}{3}(\overline{I_A} + \overline{I_B} + \overline{I_C})\end{aligned}\quad (4.29)$$

kde \overline{a} je operátor natočení, pro který platí

$$\begin{aligned}\overline{a} &= 1 \angle 120^\circ \\ \overline{a}^2 &= 1 \angle 240^\circ \\ 1 + \overline{a} + \overline{a}^2 &= 0\end{aligned}\quad (4.30)$$

Všechny tři soustavy – sousledná, zpětná, netočivá lze považovat za samostatné. Symetrické napětí zdroje $\overline{E_{(1)}}$, $\overline{E_{(2)}}$, $\overline{E_{(0)}}$ se získá sečtením symetrických napětí a symetrických úbytků napětí na jednotlivých zkratových impedancích $\overline{Z_{(1)}}$, $\overline{Z_{(2)}}$, $\overline{Z_{(0)}}$.

$$\begin{aligned}\overline{E_{(1)}} &= \overline{U_{(1)}} + \overline{I_{(1)}} \cdot \overline{Z_{(1)}} \\ \overline{E_{(2)}} &= \overline{U_{(2)}} + \overline{I_{(2)}} \cdot \overline{Z_{(2)}} \\ \overline{E_{(0)}} &= \overline{U_{(0)}} + \overline{I_{(0)}} \cdot \overline{Z_{(0)}}\end{aligned}\quad (4.31)$$

Jelikož je alternátor zdrojem pouze sousledné složky napětí, lze rovnice (4.31) přepsat

$$\begin{aligned}\overline{E_{(1)}} &= \overline{U_{(1)}} + \overline{I_{(1)}} \cdot \overline{Z_{(1)}} \\ 0 &= \overline{U_{(2)}} + \overline{I_{(2)}} \cdot \overline{Z_{(2)}} \\ 0 &= \overline{U_{(0)}} + \overline{I_{(0)}} \cdot \overline{Z_{(0)}}\end{aligned}\quad (4.32)$$

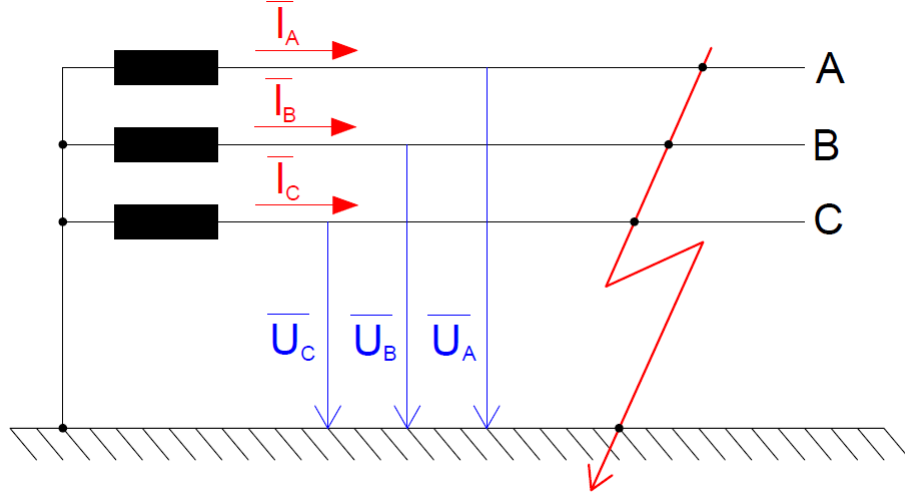
Z těchto rovnic lze odvodit, že původcem proudu zpětné a netočivé soustavy je napěťová nesymetrie v místě poruchy.

Text kapitoly byl vytvořen podle [3], [4].

4.4.1 Výpočet trojfázového zkratu

Při předpokladu sítě naprázdno z Obr. 4-4 vyplývá, že napětí v místě zkratu se rovnají nule.

$$\overline{U}_A = \overline{U}_B = \overline{U}_C = 0 \quad (4.33)$$



Obr. 4-4: Trojfázový zkrat

Za předpokladu z rovnice (4.33) a dosazením do (4.26), vychází rovnice:

$$\begin{aligned} \overline{U}_A &= \overline{U}_{A(1)} + \overline{U}_{A(2)} + \overline{U}_{A(0)} = 0 \\ \overline{U}_B &= \overline{a}^2 \cdot \overline{U}_{B(1)} + \overline{a} \cdot \overline{U}_{B(2)} + \overline{U}_{B(0)} = 0 \\ \overline{U}_C &= \overline{a} \cdot \overline{U}_{C(1)} + \overline{a}^2 \cdot \overline{U}_{C(2)} + \overline{U}_{C(0)} = 0 \end{aligned} \quad (4.34)$$

Následným dosazením (4.34) do (4.32) vychází

$$\overline{I}_{(1)} = \frac{\overline{E}}{\overline{Z}_{(1)}} \quad \overline{I}_{(2)} = \overline{I}_{(0)} = 0 \quad (4.35)$$

Dosazením vypočítaných proudů (4.35) do rovnic (4.27) vychází jednotlivé fázové zkratové proudy.

$$\begin{aligned} \overline{I}_A &= \frac{\overline{E}}{\overline{Z}_{(1)}} \\ \overline{I}_B &= \overline{a}^2 \cdot \frac{\overline{E}}{\overline{Z}_{(1)}} \\ \overline{I}_C &= \overline{a} \cdot \frac{\overline{E}}{\overline{Z}_{(1)}} \end{aligned} \quad (4.36)$$

Dosazením rovnice (4.1) do (4.36) získáme vztah pro výpočet velikosti počátečního rázového třífázového zkratového proudu:

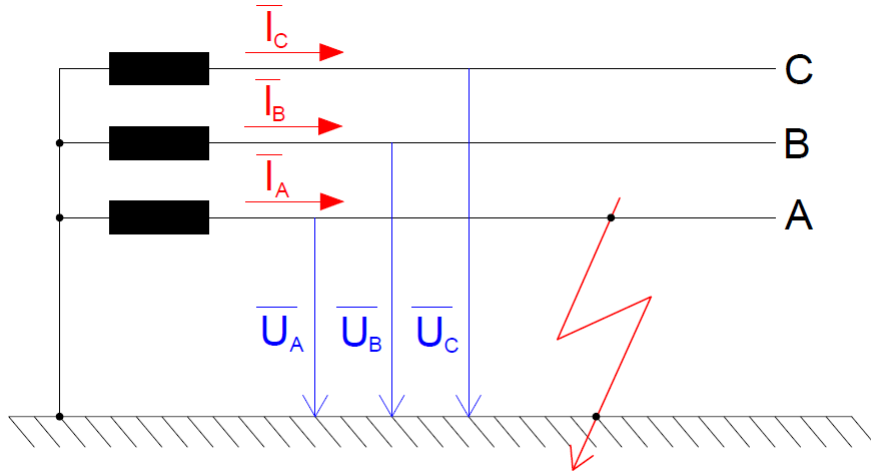
$$^{(3)}I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_{(1)}|} \quad (4.37)$$

Text kapitoly byl vytvořen podle [3], [4].

4.4.2 Výpočet jednofázového zkratu

Při výpočtu se vychází z předpokladu, že soustava je ve stavu naprázdno a napětí postižené fáze je nulové.

$$\overline{U}_A = 0 \quad \overline{I}_B = \overline{I}_C = 0 \quad (4.38)$$



Obr. 4-5: Jednofázový zkrat

Podle rovnic (4.26) a (4.27) budou fázory napětí a proudů v místě poruchy

$$\begin{aligned} \overline{U}_A &= \overline{U}_{(0)} + \overline{U}_{(1)} + \overline{U}_{(2)} = 0 \\ \overline{I}_B &= \overline{I}_{(0)} + \overline{a}^{-2} \cdot \overline{I}_{(1)} + \overline{a} \cdot \overline{I}_{(2)} = 0 \\ \overline{I}_C &= \overline{I}_{(0)} + \overline{a} \cdot \overline{I}_{(1)} + \overline{a}^{-2} \cdot \overline{I}_{(2)} = 0 \end{aligned} \quad (4.39)$$

Vzájemným odečtením rovnic proudu (4.39) dostaneme

$$(\overline{a} - \overline{a}^{-2}) \overline{I}_{(1)} + (\overline{a}^{-2} - \overline{a}) \overline{I}_{(2)} = 0 \quad (4.40)$$

Z toho vyplývá $\overline{I}_{(1)} = \overline{I}_{(2)}$. Dosadíme-li tuto rovnost do rovnice (4.27), zjistíme, že

$$\overline{I}_{(1)} = \overline{I}_{(2)} = \overline{I}_{(0)} \quad (4.41)$$

Základní rovnice (4.32) mají po dosazení (4.41) tvar

$$\begin{aligned}\overline{E_{(1)}} &= \overline{U_{(1)}} + \overline{I_{(1)}} \cdot \overline{Z_{(1)}} \\ 0 &= \overline{U_{(2)}} + \overline{I_{(1)}} \cdot \overline{Z_{(2)}} \\ 0 &= \overline{U_{(0)}} + \overline{I_{(1)}} \cdot \overline{Z_{(0)}}\end{aligned}\tag{4.42}$$

Sečtením rovnic (4.42) a při respektování (4.39) vyjde

$$\overline{E_{(1)}} = \overline{I_{(1)}} \cdot (\overline{Z_{(1)}} + \overline{Z_{(2)}} + \overline{Z_{(0)}})\tag{4.43}$$

kde

$$\overline{I_{(1)}} = \overline{I_{(2)}} = \overline{I_{(0)}} = \frac{\overline{E_{(1)}}}{\overline{Z_{(1)}} + \overline{Z_{(2)}} + \overline{Z_{(0)}}}\tag{4.44}$$

Zkratový proud ve fázi A bude

$$\overline{I_{(A)}} = \frac{3 \cdot \overline{E_{(1)}}}{\overline{Z_{(1)}} + \overline{Z_{(2)}} + \overline{Z_{(0)}}}\tag{4.45}$$

Dosazením rovnice (4.1) do (4.45) získáme vztah pro výpočet velikosti počátečního rázového jednofázového zkratového proudu:

$${}^{(1)}I_k'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{|\overline{Z_{(1)}} + \overline{Z_{(2)}} + \overline{Z_{(0)}}|}\tag{4.46}$$

Text kapitoly byl vytvořen podle [3], [4].

5 DISTRIBUČNÍ SOUSTAVA E.ON VÝCHOD - OBLAST SOKOLNICE

Uzlová oblast rozvodny Sokolnice je součástí distribučního území E.ON Distribuce, a.s. oblast východ.

5.1 Popis distribuční oblasti E.ON východ

Společnost E.ON Distribuce provozuje sítě na napěťové hladině VVN 110 kV, VN 22 kV a NN 0,4 kV. Distribuční síť je převážně napájena z přenosové soustavy prostřednictvím nadřazených transformací 400/220/110 kV, které jsou v majetku ČEPS. DS je dále částečně napájena z elektráren E.ON, závodních elektráren a dalších lokálních zdrojů.

Nadřazené transformační stanice

DS 110 kV na zásobovacím území E.ON Distribuce oblast východ je napájena z nadřazené soustavy (400 kV, 220 kV) prostřednictvím těchto transformací:

- | | | |
|------------------|-------------------|---|
| • 400/110 kV | Čebín | 2x 350 MVA, 1x 250 MVA |
| • 400/110 kV | Otrokovice | 2x 350 MVA, 1x 250 MVA |
| • 400/110 kV | Slavětice | 2x 250 MVA |
| • 400/110 kV | Mírovka | 2x 250 MVA (jeden transformátor vyčleněn pro oblast východ, druhý pro oblast západ) |
| • 400/220/110 kV | Sokolnice | 1x 400 MVA (400/220 kV)
1x 350 MVA (400/110 kV)
2x 200 MVA (220/110 kV) |

Distribuční síť 110 kV

Distribuční síť je v oblasti východ provozována v devíti (v zimním období v jedenácti) oddělených systémech, které přísluší jednotlivým transformátorům 400/110 kV nebo 220/110 kV. Tyto systémy jsou provozovány s maximálním možným zakruhováním jednotlivých síťových celků a rozpojovací místa jsou volena tak, aby se z hlediska ztrát provoz sítě 110 kV blížil paralelnímu chodu.

Distribuční síť 22 kV

Je napájena prostřednictvím distribučních transformátorů 110/22 kV. Síť se provozuje téměř výhradně jako paprsková, ve výjimečných situacích z důvodu zlepšení spolehlivosti nebo zlepšení napěťových poměrů je provozována i paralelně.

Distribuční síť 0,4 kV

Provoz sítí nízkého napětí je převážně určen jejich stavem a typem městské aglomerace. V oblastech s nízkým a středním zalidněním se síť provozují jako paprskové, v oblastech s vysokou hustotou zalidnění převládají síť polomřížové a mřížové.

Úplné zapojení DS 110 kV E.ON je uvedeno v příloze. Text kapitoly byl vytvořen podle [7].

Rozvodna Sokolnice (SO) s transformací 400/220/110 kV je připojena k přenosové soustavě 400 kV vedeními č. 417 (Sokolnice – Otrokovice), 423 (Sokolnice – Čebín), 435 a 436 (Sokolnice – Slavětice), se Slovenskem je spojena pomocí přeshraničních vedení č. 424 (Sokolnice – Křižovany), a 497 (Sokolnice – Stupava).

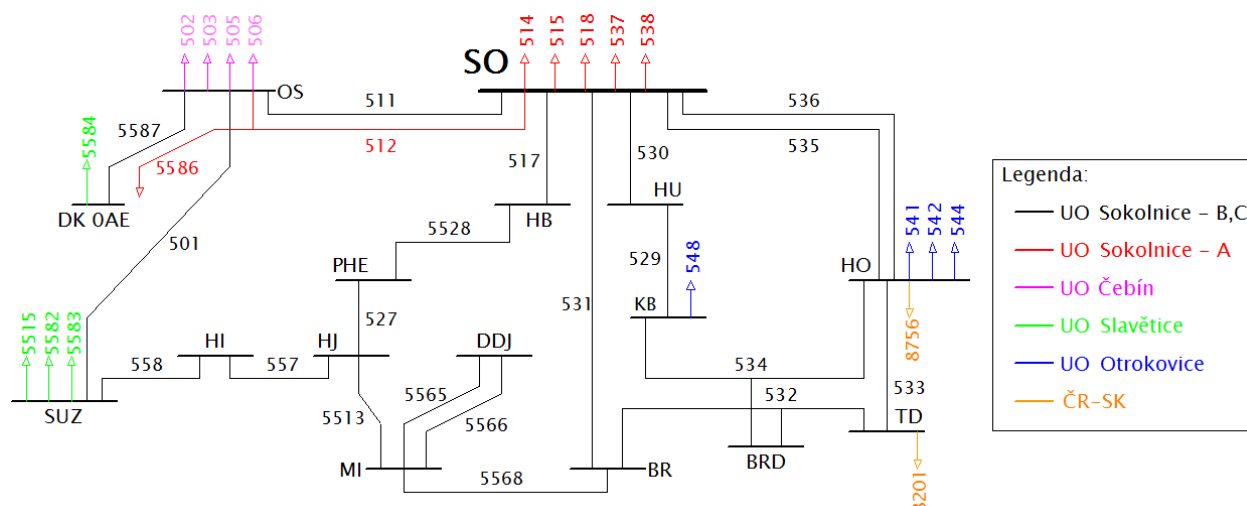
Tepelné elektrárny	
Vodní elektrárny	
Rozvodny	

	400 kV	220 kV
Jednoduché vedení		
Dvojitě vedení		
Dvojitě, I. pořadí vyzbrojen		
Dvojitě vedení ve výstavbě		
v návrhu		
mimo provoz		

Rozvodna 110 kV Sokolnice je vybavena třemi systémy přípojníc (A, B, C), které jsou podélně dělitelné. Dále je vybavena pomocnou přípojnící a dvěma kombinovanými spínači přípojníc. R 110 kV je napájena třemi transformátory: T402 (350 MVA 400/110 kV), T202 a T203 (200 MVA 220/110 kV). Transformátor T402 je přiveden na přípojnici A, T202 na přípojnici C a T203 na přípojnici B. Přípojnice B a C jsou propojeny přes příčný spínač přípojníc, transformátory T202 a T203 jsou zapojeny v můstkovém (paralelním) chodu.

K přípojnici B jsou připojena vedení č. 511, 531, 535 (vypnuto). Přípojnice je přes příčný spínač připojena k přípojnici C.

Z přípojnice C je vyveden výkon pomocí vedení č. 530, 536, 517.



Obr. 5-2: Zjednodušené schéma UO Sokolnice

Břeclav (BR)

Rozvodna s jedním podélně děleným systémem přípojníc. Jsou zde nainstalovány dva transformátory 110/22 kV T101 a T102, každý o výkonu 40 MVA. Rozvodna je připojena vedeními č. 531, 532 a 5568.

Břeclav, Správa železniční dopravní cesty, a.s. (BRD)

Rozvodna s jedním podélně děleným přípojnicovým systémem. Je ve vlastnictví SŽDC. V rozvodně jsou provozovány dva drážní transformátory 110/25 kV T1 a T2, každý o výkonu 13,3 MVA. Rozvodna je připojena vedeními typu T č. 532 a 534.

Dolní Dunajovice (DDJ)

Rozvodna tvořená jedním podélně děleným systémem přípojníc. V rozvodně jsou dva transformátory 110/6 kV T101 a T102 o výkonu 10 MVA. Rozvodna je připojena vedeními č. 5565 a 5566 s R Mikulov.

Dukovany 0AE (DK)

Rozvodna určená k napájení vlastní spotřeby Jaderné elektrárny Dukovany. Jsou zde dva transformátory T01 a T02 se jmenovitým výkonem 40 MVA. Transformátor T01 je napájen vedením č. 5584 z UO Slavětice, T02 pak vedením č. 5587 z UO Sokolnice. V době provedení výpočtu bylo vedení 5587 vypnuto.

Hrušovany u Brna (HB)

Rozvodna s jedním podélně děleným systémem přípojníc. Jsou zde umístěny dva transformátory 110/22 kV T101 a T102 o výkonu 40 MVA. K rozvodně vedou vedení č. 517 a 5528.

Hodonice (HI)

Rozvodna s jedním podélně děleným systémem přípojníc. Jsou zde instalovány dva transformátory 110/22 kV T101 a T102, každý o výkonu 25 MVA. Rozvodna je propojena dvěma vedeními č. 557 a 558.

Hrušovany nad Jevišovkou (HJ)

Rozvodna tvořená jedním podélně děleným systémem přípojníc. Do rozvodny je vyveden výkon 12 MVA z turbogenerátoru cukrovaru AGRARNA. V rozvodně jsou dále umístěny dva

transformátory 110/22 kV T101 (25 MVA) a T102 (40 MVA). Rozvodna je připojena vedeními č. 527, 557 a 5513.

Hodonín (HO)

Rozvodna Hodonín je tvořena dvěma podélně dělitelnými systémy přípojníc. Obvykle je jeden přípojnícový systém využíván oblastí Sokolnice a druhý oblastí Otrokovice. Do rozvodny je přes blokové transformátory T8 a T10 (63 MVA) vyveden výkon dvou turbogenerátorů TG3 a TG4 (63 MVA) z Elektrárny Hodonín. V rozvodně jsou instalovány tři distribuční transformátory 110/22 kV T6, T7 a T13 o výkonu 40 MVA a dva menší transformátory 110/6,3 kV T5 (12,5 MVA) a T12 (16 MVA). V UO Sokolnice je rozvodna připojena čtyřmi vedeními č. 533, 534, 535 a 536. V UO Otrokovice pak třemi vedeními č. 541, 542 a 544. Rozvodna Hodonín je vedením č. 8756 spojena s R Holíč na Slovensku.

V době výpočtu byla rozvodna připojena přípojnícemi A a B1 k UO Sokolnice, druhou částí přípojnice B2 je připojena k UO Otrokovice. Hodonínská elektrárna pracuje do UO Otrokovice.

Hustopeče (HU)

Rozvodna s jedním podélně děleným přípojnícovým systémem. V rozvodně jsou instalovány dva distribuční transformátory 110/22 kV T101 a T102, každý o výkonu 25 MVA. Rozvodna je spojena vedeními č. 529 a 530.

Klobouky (KB)

Rozvodna Klobouky je tvořena jedním systémem přípojníc. Jsou zde umístěny dva transformátory 110/6 kV T101 a T102 o výkonu 10 MVA, dále jeden transformátor 110/22 kV T103 o výkonu 25 MVA. Transformátory T101 a T102 jsou ve vlastnictví společnosti ČEPRO a.s., slouží k napájení průmyslového objektu. Rozvodna je připojena vedeními č. 529, 534 a 548 (toto vedení je vypnuto, slouží pro připojení k rozvodně Kyjov v UO Otrokovice).

Mikulov (MI)

Rozvodna je tvořena jedním systémem podélně dělených přípojníc. Jsou zde instalovány dva transformátory 110/22 kV T101 (25 MVA) a T102 (40 MVA). K rozvodně jsou připojeny čtyři vedení č. 5513, 5565, 5566 a 5568.

Oslavany (OS)

Rozvodna se sestává ze dvou systémů přípojníc. Za normálního provozu je jeden přípojnícový systém využíván UO Čebín (přípojnice A), druhý UO Sokolnice (přípojnice B). Jsou zde instalovány tři transformátory 110/22 kV T101 (25 MVA), T102 a T103 (40 MVA). Z UO Čebín je rozvodna připojena čtyřmi vedeními č. 502, 503, 505 a 506. V UO Sokolnice je pak propojena pěti vedeními č. 501, 511, 512, 5586 a 5587.

Pohořelice (PHE)

Rozvodna tvořená jedním systémem podélně dělených přípojníc. Je zde umístěn jeden distribuční transformátor 110/22 kV T101 se jmenovitým výkonem 25 MVA. Rozvodna je připojena vedeními č. 527 a 5528.

Suchohrdly u Znojma (SUZ)

Rozvodna je tvořena dvěma přípojnícovými systémy. Za normálního provozu je jeden přípojnícový systém (přípojnice B) využíván pro oblast Sokolnice a druhý (přípojnice A) pro oblast Slavětice. Jsou zde instalovány tři transformátory 110/22 kV T101, T102 a T103,

každý o výkonu 40 MVA. Rozvodna je připojena z UO Sokolnice dvěma vedeními 501 a 558 a z UO Slavětice třemi vedeními č. 5515, 5582 a 5583.

Tvrdonice (TD)

Rozvodna Tvrdonice je tvořena jedním systémem přípojníc. Jsou zde umístěny dva transformátory 110/6 kV T101 (25 MVA) a T102 (16 MVA). Rozvodna je připojena vedeními č. 532, 533 a 8201 (přeshraniční vedení do R Senice na Slovensku).

Text kapitoly byl vytvořen podle [7], [8], [9].

6 MŮSTKOVÝ PROVOZ TRANSFORMÁTORŮ T202 A T203

Výpočet ustáleného chodu a zkratových poměrů byl proveden na Dispečinku 110 kV E.ON v Brně na dispečerském řídicím programu SINAUT SPECTRUM 4.4. Tento program umožňuje řídit soustavu i provádět síťovou analýzu. Současně si může stáhnout i aktuální konfiguraci sítě a pracovat s ní, aniž by ovlivnil skutečný chod soustavy. **Všechny výpočty jsou provedeny s daty získanými 19. 3. 2014 v 10:10.** Program pracuje na principu Newtonovi iterační metody (kap. 2.3.2), vedení jsou nahrazována π -články. Všechny vypočítané hodnoty program ukládá do souborů typu txt.

Při výpočtu ustáleného chodu sítě budou kontrolovány následující hodnoty. Je-li napětí v uzlech (rozvodnách) sítě v toleranci 110 kV $\pm 10\%$, tedy jestli je v intervalu 99 kV až 121 kV. Dále zda nejsou transformátory (400/110 kV, 220/110 kV, 110/VN kV) proudově přetížené a jaké mají činné ztráty. Další kontrolované hodnoty jsou zatížení vedení a celková bilance sítě. Tyto hodnoty budou kontrolovány jak při můstkovém provozu transformátorů T202 a T203, tak při můstkovém provozu T402 a T403 a mimořádných stavech.

Při výpočtu zkratových poměrů se budou sledovat velikosti jednofázových a trojfázových zkratových výkonů a proudů a v uzlech sítě. Vypočítané hodnoty budou porovnány se jmenovitou zkratovou odolností jednotlivých rozveden.

6.1 Můstkové zapojení

Můstkové zapojení transformátorů spočívá ve spojení přípojníc, do kterých pracují transformátory, příčným spínačem. Dále je potřeba rozdělit linky, které napájí danou oblast na různé přípojnice.

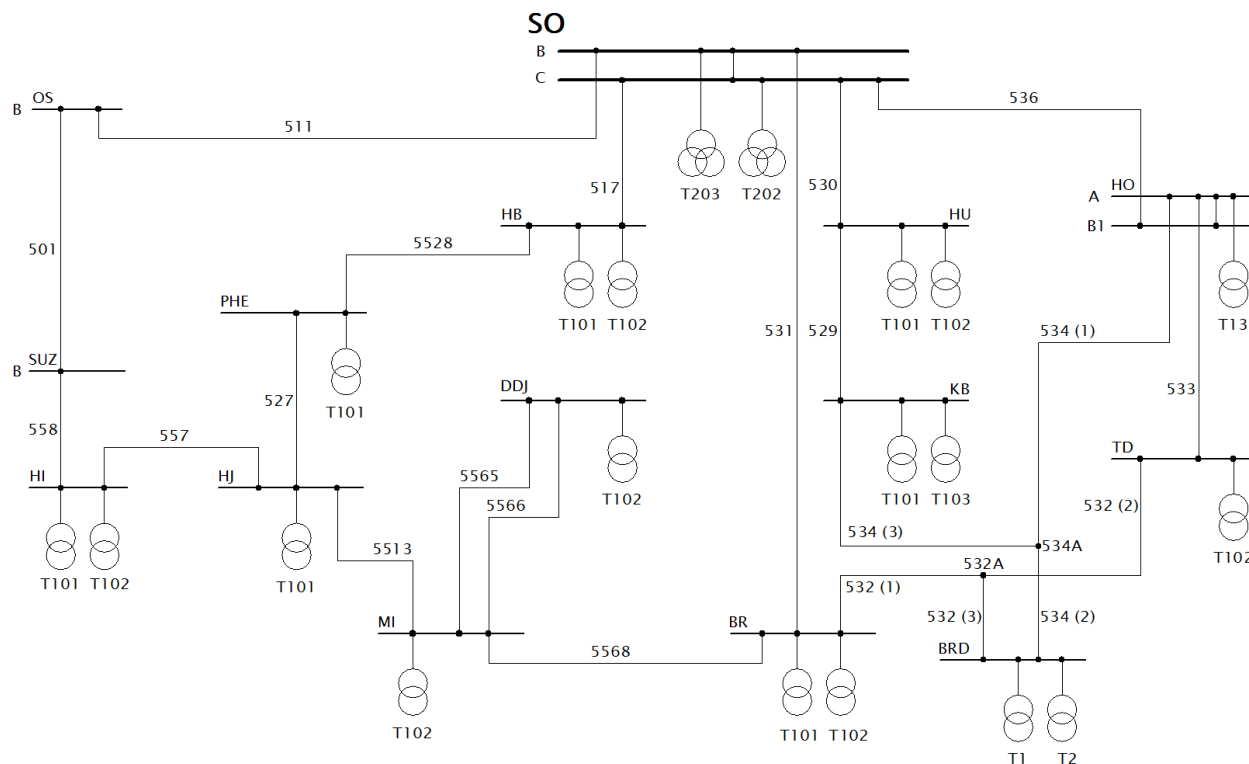
Transformátor T202 je připojen k přípojnici C, T203 k přípojnici B. Přípojnice jsou spojeny příčným spínačem. K přípojnici B jsou připojena vedení č. 511 (Oslavany) a 531 (Břeclav), na přípojnici C jsou napojena vedení č. 517 (Hrušovany u Brna), 530 (Hustopeče) a 536 (Hodonín).

Výhodou můstkového zapojení je zvýšení spolehlivosti dodávky. Dojde-li k poruše na jednom z transformátorů nebo na příslušné přípojnici, ochrany odpojí dané místo. Tímto nedojde k výpadku dodávky elektrické energie na linkách jdoucích z vyřazené přípojnice, protože jsou stále napájeny z přípojnice bez poruchy. Další výhodou je zlepšení napěťových poměrů v oblasti.

Nevýhodou můstkového provozu transformátorů (paralelního zapojení) je snížení zkratové impedance, čímž se zvýší zkratový proud.

6.2 Ustálený chod

Současný provoz UO Sokolnice při můstkovém provozu transformátorů T202 a T203 je popsán v kapitole 5.2. Transformátor T202 je vyveden na přípojnici C, T203 na přípojnici B. Přípojnice jsou spojeny příčným spínačem – transformátory jsou zapojeny v můstkovém zapojení. Vedení jsou zkruhována tak, aby jedna strana byla přivedena na přípojnici B, a druhá na přípojnici C. Podrobné schéma je na Obr. 6-1.



Obr. 6-1: Schéma můstkového provozu T202 a T203 v R 110 kV Sokolnice

Schéma znázorňuje zapojení, které bylo podrobeno zkoumání. Transformátory, které jsou uvedeny v popisu UO Sokolnice (kap. 5.2) a nejsou vyznačeny ve schématu jsou vypnuty, nebo pracují v jiné UO. Vedení č. 535 (SO – HO) a 5587 (OS – DK 0AE) byla v době výpočtu vypnuta.

Napěťové poměry v rozvodnách

Tab. 6-1: Napěťové poměry v rozvodnách 110 kV - můstkové zapojení T202 a T203

Rozvodna	U [kV]	δ [°]	Rozvodna	U [kV]	δ [°]
BR	117,0	-2,36	KB	117,4	-2,12
BRD	117,3	-2,22	MI	117,2	-2,01
DDJ	117,2	-2,01	OS-B	118,2	-1,34
HB	118,1	-1,36	PHE	117,8	-1,50
HI	117,6	-1,54	SO-B	118,4	-1,20
HJ	117,7	-1,53	SO-C	118,4	-1,20
HO	117,2	-2,26	SUZ-B	117,7	-1,51
HU	117,7	-1,80	TD	117,1	-2,33

Zhodnocení:

Všechna napětí jsou v dovolené toleranci. Nejvyšší napětí (zvýrazněno **zeleně**) se nachází na přípojnicích v R 110 kV Sokolnice – 118,4 kV. Nejnižší napětí (zvýrazněno **oranžově**) je v R 110 kV Břeclav – 117,0 kV. Fáze napětí se pohybuje v rozmezí od -1,20° k -2,36°.

Zatížení transformátorů

Transformátory jsou rozděleny do dvou tabulek, podle toho, zda dodávají nebo odebírají výkon. U některých transformátorů je místo ztráty výkonu napsáno x. Tyto transformátory nepatří společnosti E.ON, ale odběratelům. Velikosti odběrů jednotlivých transformátorů se v průběhu dalších výpočtů nemění, proto lze vycházet z Tab. 6-3.

a) Transformátory dodávající výkon

Tab. 6-2: Transformátory dodávající výkon – můstkové zapojení T202 a T203

Rozvodna	Typ	Převod	S_{nT}	I_{nT}	P_{dodT}	Q_{dodT}	ΔP_T	I_T	i_{zT}
	[-]	[kV]	[MVA]	[A]	[MW]	[MVAr]	[MW]	[A]	[%]
SO-B	T203	220/110	200	1050	35,2	-0,1	0,008	171,6	16,34
SO-C	T202	220/110	200	1050	26,8	10,7	0,004	140,6	13,39
DDJ	T102	110/6	10	52	0,1	-0,1	x	0,7	1,35
HI	T101	110/22	25	131	3,4	-1,3	0,035	18	13,74
HJ	T101	110/22	40	210	13,2	-3,8	0,034	67,6	32,19
					ΣP_{dodT}	78,7	$\Sigma \Delta P_T$	0,081	

Zhodnocení:

Žádný z transformátorů dodávajících výkon není přetížený. Transformátory T202 a T203 zapojené do můstku, jsou zatíženy na 13,39 % respektive 16,34 %. Nejvíce je zatížen transformátor T101 v R 110 kV v Hrušovanech nad Jevišovkou a to na 32,2 %. Celková dodávka činného výkonu je 78,7 MW, činné ztráty jsou 81 kW.

b) Transformátory odebírající výkon

Tab. 6-3: Transformátory odebírající výkon – můstkové zapojení T202 a T203

Rozvodna	Typ	Převod	S_{nT}	I_{nT}	P_{odbT}	Q_{odbT}	ΔP_T	I_T	i_{zT}
	[-]	[kV]	[MVA]	[A]	[MW]	[MVAr]	[MW]	[A]	[%]
BR	T101	110/22	40	210	-9,3	-2,4	0,052	47,6	22,67
	T102	110/22	40	210	-15,8	-3,9	0,052	80,3	38,24
BRD	T1	110/25	13,3	70	-0,3	-33,4	x	164,4	234,86
	T2	110/25	13,3	70	-0,3	32,4	x	159,5	227,86
HB	T101	110/22	40	210	0	0	0,021	0,2	0,10
	T102	110/22	40	210	-5,0	-3,4	0,040	29,5	14,05
HI	T102	110/22	25	131	-7,3	-2,4	0,040	37,7	28,78
HO	T13	110/22	40	210	-8,9	-1,8	0,050	44,6	21,24
HU	T101	110/22	25	131	-7,5	-2,3	0,023	38,6	29,47
	T102	110/22	25	131	0	0	0,014	0,1	0,08
KB	T101	110/6	10	52	0	0,1	x	0,7	1,35
	T103	110/22	25	131	-6,4	-2,7	0,038	34,4	26,26
MI	T102	110/22	40	210	-9,6	-2,1	0,039	48,4	23,05
PHE	T101	110/22	25	131	-7,9	-2	0,024	39,8	30,38
TD	T102	110/6	16	84	0	0,2	x	0,8	0,95
					ΣP_{odbT}	-78,3	$\Sigma \Delta P_T$	0,393	

Zhodnocení:

Transformátory odebírají 78,3 MW, celkové činné ztráty jsou 0,393 MW. **Transformátory T1 a T2 v R 110 kV Břeclav – SŽDC jsou přetíženy** (zvýrazněno **červeně**). Transformátory jsou zatíženy na 234,86 % a 227,86 %. Hodnoty jalového výkonu a velikost proudu jsou nejspíše vypočítány chybně. Pokud by byly správné, ochrany by transformátory odpojily. Po komunikaci s SŽDC mi bylo sděleno, že v době výpočtu nezaznamenali žádnou anomálii. Reálné hodnoty jalového výkonu by měly být zhruba desetinové. Nejvíce zatěžované transformátory jsou T102 v Břeclavi – 38,24 % a T101 v Pohořelicích – 30,38 % (zvýrazněno **oranžově**). Ostatní transformátory jsou zatíženy pod 30 %.

Zatížení vedení

Vedení typu T č. 532 a 534 jsou v tabulce uvedeny třikrát, protože se skládají ze tří úseků. Vedení č. 532 spojuje R 110 kV Břeclav a Tvrdonice, v místě 532A je z něj vyvedena odbočka na R 110 kV Břeclav SŽDC. Vedení č. 534 spojuje rozvodny 110 kV Hodonín a Klobouky, v místě 534A je připojena odbočka také na rozvodnu Břeclav SŽDC.

Tab. 6-4: Zatížení vedení - můstkové zapojení T202 a T203

Číslo vedení	Rozvodna		P_1	Q_1	I_{V1}	P_2	Q_2	I_{V2}	ΔP_V	I_{maxV}	i_V
	Od	Do	[MW]	[MVar]	[A]	[MW]	[MVar]	[A]	[MW]	[A]	[%]
501	OS-B	SUZ-B	-3,4	-1,2	17,7	3,4	2,8	21,6	0,007	455	4,75
511	SO-B	OS-B	-3,4	-0,2	16,7	3,4	1,2	17,7	0,004	455	3,89
517	SO-C	HB	-15,7	-6,9	83,9	15,7	8,0	86,1	0,019	680	12,66
527	HJ	PHE	2,8	4,3	25,4	-2,8	-2,9	20,0	0,002	455	5,58
529	HU	KB	-8,5	-0,2	41,6	8,5	1,1	42,0	0,019	455	9,23
530	SO-C	HU	-16,1	-1,7	79,0	16,0	2,5	79,6	0,070	455	17,49
531	SO-B	BR	-15,7	-1,7	76,8	15,5	3,2	78,2	0,133	455	17,19
532 (1)	BR	532A	3,6	2,4	21,2	-3,6	-2,3	20,9	0	455	4,66
532 (2)	TD	532A	-3,6	-2,1	20,4	3,6	2,2	20,7	0,001	455	4,55
532 (3)	BRD	532A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0	360	0
533	HO-A	TD	-3,5	-1,3	18,6	3,5	1,9	19,8	0,003	455	4,35
534 (1)	HO-A	534A	1,4	0,8	8,0	-1,4	-0,1	7,1	0	455	1,76
534 (2)	BRD	534A	0,6	1,0	5,6	-0,6	-0,9	5,3	0	360	1,56
534 (3)	KB	534A	-2,0	0,6	10,4	2,0	1,0	11,1	0,001	455	2,44
536	SO-C	HO-B1	-11,0	-0,2	53,9	11,0	2,4	55,3	0,084	455	12,15
557	HJ	HI	-0,5	0,1	2,3	0,5	0,7	4,0	0	455	0,88
558	HI	SUZ-B	3,4	3,1	22,6	-3,4	-2,8	21,6	0,007	455	4,97
5513	MI	HJ	15,6	1,2	76,9	-15,6	-0,6	76,7	0,052	455	16,90
5528	HB	PHE	-10,7	-4,5	56,9	10,7	4,9	57,8	0,013	455	12,70
5565	MI	DDJ	0,1	0,1	0,6	-0,1	0,1	0,7	0	180	0,39
5566	MI	DDJ	0,0	0,2	1,0	0,0	0,0	0,0	0	180	0,56
5568	BR	MI	6,1	0,7	30,0	-6,1	0,6	30,1	0,011	530	5,68
$\Sigma \Delta P_V$									0,426		

Tok výkonu na vedení lze určit pomocí znamének následovně. Například u vedení č. 501 z R 110 kV Oslavany přípojnice B k R 110 kV Suchohrdly u Znojma přípojnice B. Znaménko

mínus u výkonů P_1 a Q_1 značí, že výkon je z rozvodny Oslavany odebírán, plus na konci vedení u P_2 , Q_2 značí, že výkon je do rozvodny Suchohrdly u Znojma dodáván.

Zhodnocení:

Žádné vedení není přetížené. Vedení dosahují zatížení maximálně 17,5 %. Celkové činné ztráty na vedeních jsou 0,426 MW.

Celková bilance

Tab. 6-5: Celková bilance - můstkové zapojení T202 a T203

		P [MW]	ΔP [MW]
Transformátory	Dodávaný výkon	78,7	0,081
	Odebíraný výkon	78,3	0,393
Vedení	110 kV	x	0,426
		$\Sigma \Delta P$	0,900

Kontrola výpočtu:

Odebíraný výkon = Dodávaný výkon - Ztráty na vedení = 78,700 - 0,426 = 78,274 MW

Rozdíl 0,026 MW mezi hodnotou odebíraného výkonu a vypočítaného odebíraného výkonu je dán zaokrouhlováním, popřípadě dovolenou nepřesností výpočetního programu.

Zhodnocení:

Celkové ztráty činného výkonu na transformátorech a vedeních jsou 0,900 MW. Celkový dodávaný výkon je 78,7 MW. Ztráty tvoří 1,14 % dodávaného výkonu.

6.3 Zkratové poměry

Výpočetní program využívá pro výpočet zkratového proudu metodu ekvivalentního napěťového zdroje (kap. 4.2), což je v souladu s normou ČSN EN 60909 [6]. Napěťový koeficient c má hodnotu 1,1. Zkraty se v jednotlivých rozvodnách počítají na hlavní přípojnici. Zkratová odolnost rozveden je dána vypínací schopností jednotlivých výkonových vypínačů. Kontrola zkratové odolnosti vychází z toho, že zkratová odolnost nemůže být při trojfázovém nebo jednofázovém zkratu překročena.

Tab. 6-6: Zkratové poměry - můstkové zapojení T202 a T203

Rozvodna	Zkratová odolnost	$^{(3)}S_k''$	$^{(3)}I_k''$	$^{(1)}S_k''$	$^{(1)}I_k''$	$^{(3)}S_k''$	$^{(1)}S_k''$
	[MVA]	[MVA]	[kA]	[MVA]	[kA]	[%]	[%]
BR	3500	1 121,9	5,89	1 604,9	8,42	32,05	45,85
BRD	3500	811,6	4,26	705,7	3,70	23,19	20,16
DDJ	3500	833,0	4,37	761,5	4,00	23,80	21,76
HB	3500	2 118,8	11,12	2 909,6	15,27	60,54	83,13
HI	3500	924,7	4,85	869,1	4,56	26,42	24,83
HJ	3500	1 263,0	6,63	1 243,5	6,53	36,09	35,53
HO	2500	1 045,8	5,49	1 066,5	5,60	41,83	42,66
HU	3500	1 119,6	5,88	1 026,0	5,39	31,99	29,31

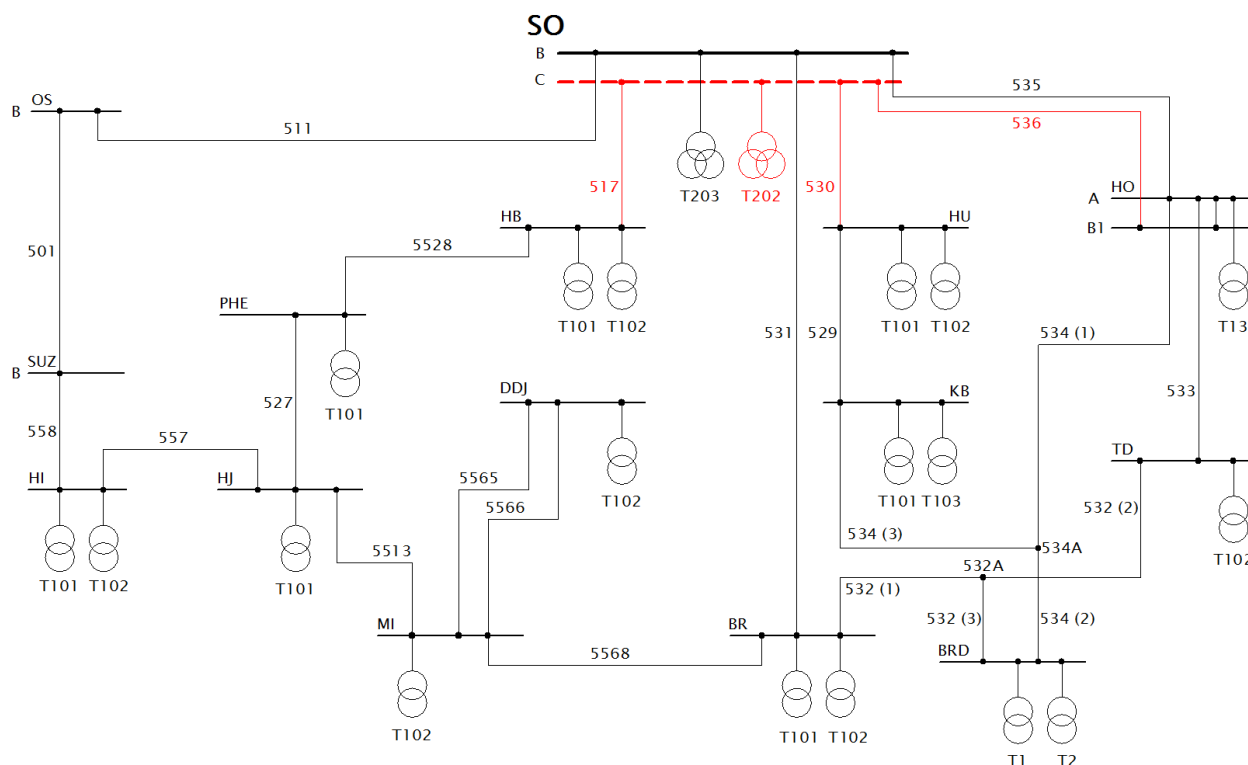
KB	3500	829,7	4,36	738,8	3,88	23,71	21,11
MI	3500	968,8	5,09	948,0	4,98	27,68	27,09
OS-B	3500	1 079,6	5,67	796,5	4,18	30,85	22,76
PHE	3500	1 478,6	7,76	1 522,1	7,99	42,25	43,49
SO-B,C	5000	3 608,7	18,94	2 904,8	15,25	72,17	58,10
SUZ-B	3500	872,1	4,58	738,1	3,87	24,92	21,09
TD	3500	1 058,7	5,56	1 255,2	6,59	30,25	35,86

Zhodnocení:

Zkratová odolnost všech R 110 kV je dostatečná. Nejvíce zatížené rozvodny třífázovým zkratovým výkonem jsou Sokolnice – 72,17 % a Hrušovany u Brna – 60,54 % (vyznačeno zeleně). Zatížení jednofázovým zkratovým výkonem je maximální v Hrušovanech u Brna – 83,13 % a v Sokolnicích – 58,10% (označeno oranžově). U ostatních rozvodů nepřesáhlo zatížení 50 %.

6.4 Výpadek přípojnice C

V této kapitole je kontrolováno zapojení sítě na jeden mimořádný stav, v němž je jedna přípojnice z důvodu poruchy nebo revize vypnuta. Při výpočtu ustáleného chodu budou kontrolovány napěťové poměry v rozvodnách, zatížení transformátorů, zatížení vedení a celková bilance výkonu. Schéma je zobrazeno na Obr. 6-2.



Obr. 6-2: Schéma UO Sokolnice při výpadku přípojnice C s T202

Poznámka ke schématu – přípojnice C, která je zobrazena červenou přerušovanou čarou, je vypnuta. Červeně zobrazená vedení (č. 517, 530, 536) jsou od přípojnice C odpojena. Vedení

č. 535 je nyní zapnuto, protože minimálně jedno vedení č. 535 nebo 536 by spojovalo rozvodny SO a HO.

Napěťové poměry

Tab. 6-7: Napěťové poměry v rozvodnách 110 kV - výpadek přípojnice C, T203 v provozu

Rozvodna	U [kV]	δ [°]	Rozvodna	U [kV]	δ [°]
BR	114,5	-4,14	KB	113,5	-5,38
BRD	114,3	-4,65	MI	114,1	-4,07
DDJ	114,1	-4,07	OS-B	116,3	-2,60
HB	113,8	-4,00	PHE	113,9	-3,92
HI	114,6	-3,46	SO-B	117,2	-2,10
HJ	114,1	-3,72	SO-C	0	0
HO	114,7	-4,25	SUZ-B	114,9	-3,32
HU	113,2	-5,67	TD	114,6	-4,18

Zhodnocení:

Při výpadku přípojnice C v R 110 kV Sokolnice (označeno **červeně**) je **napětí v podružných rozvodnách v dovolené toleranci**. Nejnižší napětí je v R 110 kV Hustopeče – 113,2 kV (označeno **oranžově**). Fáze napětí je v rozmezí od $-2,10^\circ$ k $-5,67^\circ$.

Transformátory

a) Transformátory dodávající výkon

Tab. 6-8: Transformátory dodávající výkon - výpadek přípojnice C, T203 v provozu

Rozvodna	Typ	Převod	S_{nT}	I_{nT}	P_{dodT}	Q_{dodT}	ΔP_T	I_T	i_{zT}
	[-]	[kV]	[MVA]	[A]	[MW]	[MVar]	[MW]	[A]	[%]
SO-B	T203	220/110	200	1050	62,3	11,2	0,025	311	29,62
SO-C	T202	220/110	200	1050	0	0	0	0	0
DDJ	T102	110/6	10	52	0,1	-0,1	x	0,7	1,35
HI	T101	110/22	25	131	3,6	-1,4	0,034	19,4	14,81
HJ	T101	110/22	40	210	13,5	-3,9	0,035	71,3	33,95
ΣP_{dodT}					79,5	$\Sigma \Delta P_T$	0,094		

Zhodnocení:

Žádný z transformátorů dodávajících výkon není přetížen. T202 je po výpadku přípojnice C odpojen (označeno **červeně**). Transformátor T203 převzal dodávku výkonu od T202. Nejvíce zatížené transformátory jsou T101 v Hrušovanech nad Jevišovkou – 33,95 % a T203 v Sokolnicích – 29,62 % (označeno **oranžově**). Celkový dodávaný výkon se zvedl na 79,5 MW, ztráty činného výkonu jsou 94 kW.

b) Transformátory dodávající výkon

Odběr všech transformátor je stejný jako v Tab. 6-3.

Vedení

Tab. 6-9: Zatížení vedení - výpadek přípojnice C, T203 v provozu

Číslo vedení	Rozvodna		P_1	Q_1	I_{V1}	P_2	Q_2	I_{V2}	ΔP_V	I_{maxV}	i_V
	Od	Do	[MW]	[MVar]	[A]	[MW]	[MVar]	[A]	[MW]	[A]	[%]
501	OS-B	SUZ-B	-12,8	-5,0	68,2	12,7	6,3	71,3	0,090	455	15,67
511	SO-B	OS-B	-12,8	-4,1	66,5	12,8	5,0	68,2	0,056	455	14,99
517	SO-C	HB	0	0	0	0	1,0	5,1	0	680	0,75
527	HJ	PHE	-12,9	-2,7	66,8	12,9	4,0	68,5	0,015	455	15,05
529	HU	KB	7,3	1,5	37,9	-7,3	-0,7	37,2	0,015	455	8,33
530	SO-C	HU	0	0,0	0	0	0,9	4,5	0	455	0,99
531	SO-B	BR	-27,5	-5,3	137,8	27,0	6,0	139,6	0,428	455	30,68
532 (1)	BR	532A	-1,8	3,4	19,3	1,8	-3,3	18,9	0,003	455	4,24
532 (2)	TD	532A	1,8	-3,1	18,0	-1,8	3,2	18,6	0,001	455	4,09
532 (3)	BRD	532A	0	0	0	0	0,1	0,3	0,001	360	0
533	HO-A	TD	1,9	-2,3	15,1	1,9	2,9	17,4	0,002	455	3,82
534 (1)	HO-A	534A	-14,4	-1,4	73,0	14,4	1,9	73,3	0,041	455	16,11
534 (2)	BRD	534A	0,6	0,9	5,4	-0,6	-0,8	5,1	0	360	1,50
534 (3)	KB	534A	13,7	2,4	71,0	-13,8	-1,0	70,0	0,074	455	15,60
535	SO-B	HO-A	-21,8	-1,7	107,9	21,5	3,2	109,2	0,379	455	24,00
536	SO-C	HO-B1	0,0	0,0	0,0	0,0	2,3	11,6	0,001	455	2,55
557	HJ	HI	9,0	3,4	48,5	-9,0	-2,8	47,4	0,020	455	10,66
558	HI	SUZ-B	12,7	6,6	72,0	-12,7	-6,3	71,3	0,019	455	15,82
5513	MI	HJ	9,6	-2,5	50,1	-9,6	3,2	51,1	0,022	455	11,23
5528	HB	PHE	5,1	2,4	28,4	-5,1	-2,0	27,6	0,003	455	6,24
5565	MI	DDJ	0,1	0,1	0,6	-0,1	0,1	0,7	0	180	0,39
5566	MI	DDJ	0	0,2	1,0	0	0	0	0	180	0,56
5568	BR	MI	0	-3,2	16,0	0	4,4	22,2	0,005	530	4,19
									$\Sigma \Delta P_V$	1,175	

Zhodnocení:

Žádné vedení není přetížené. Vypnutá vedení č. 517, 530 a 536 jsou označena červeně. Vedení č. 535 (Sokolnice-B – Hodonín-A), které bylo nově připojeno, je zatíženo na 24 %. Nejvíce zatížené je vedení č. 531 (Sokolnice-B – Břeclav), které je proudově zatíženo na 30,68 %. Tato dvě vedení jsou v tabulce označena oranžově. Celkové ztráty činného výkonu na vedení dosahují 1,175 MW.

Celková bilance

Tab. 6-10: Celková bilance - výpadek přípojnice C, T203 v provozu

		P	ΔP
		[MW]	[MW]
Transformátory	Dodávaný výkon	79,5	0,094
	Odebíraný výkon	78,3	0,393
Vedení	110 kV	x	1,175
		$\Sigma \Delta P$	1,662

Kontrola výpočtu:

$$\text{Odebíraný výkon} = \text{Dodávaný výkon} - \text{Ztráty na vedení} = 79,500 - 1,175 = 78,325 \text{ MW}$$

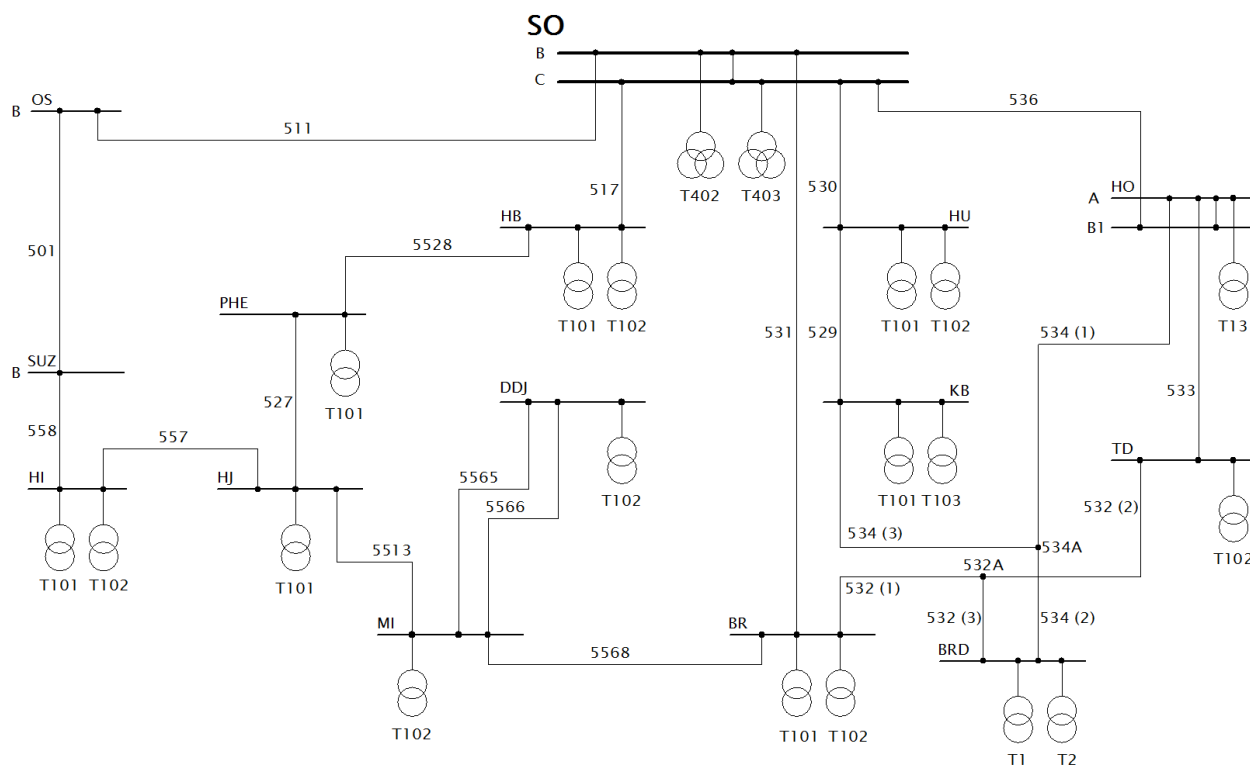
Rozdíl 0,025 MW mezi hodnotou odebíraného výkonu a vypočítaného odebíraného výkonu je dán zaokrouhlováním, popřípadě dovolenou nepřesností výpočetního programu.

Zhodnocení:

Celkový dodávaný výkon je 79,5 MW. Ztráty činného výkonu se v důsledku poruchy na přípojnici C v R 110 kV Sokolnice zvedly na 1,662 MW. Celkové procentuální ztráty vzrostly na 2,09 %.

7 MŮSTKOVÝ PROVOZ TRANSFORMÁTORŮ T402 A T403

V této kapitole je zkoumáno můstkové zapojení transformátorů T402 a T403, které nahradí můstkové zapojení transformátorů T202 a T203. Schéma zapojení je totožné se schématem v předešlé kapitole.



Obr. 7-1: Schéma můstkového provozu T402 a T403 v R 110 kV Sokolnice

7.1 Ustálený chod

Napěťové poměry v rozvodnách

Tab. 7-1: Napěťové poměry v rozvodnách 110 kV - můstkové zapojení T402 a T403

Rozvodna	U [kV]	δ [°]	Rozvodna	U [kV]	δ [°]
BR	125,3	-1,65	KB	125,6	-1,44
BRD	125,5	-1,53	MI	125,5	-1,35
DDJ	125,5	-1,35	OS-B	126,3	-0,74
HB	126,2	-0,76	PHE	126,0	-0,89
HI	125,9	-0,93	SO-B	126,5	-0,62
HJ	125,9	-0,92	SO-C	126,5	-0,62
HO	125,5	-1,56	SUZ-B	126,0	-0,90
HU	125,6	-1,16	TD	125,3	-1,63

Zhodnocení:

Napětí ve všech rozvodnách překračuje povolenou toleranci. Tato chyba je dána nesprávným nastavením odbočky na transformátoru T403 v R 110 kV Sokolnice na přípojnici C.

Zatížení transformátorů**a) Transformátory dodávající výkon**

Tab. 7-2: Transformátory dodávající výkon – můstkové zapojení T402 a T403

Rozvodna	Typ	Převod	S_{nT}	I_{nT}	P_{dodT}	Q_{dodT}	ΔP_T	I_T	i_{zT}
	[-]	[kV]	[MVA]	[A]	[MW]	[MVAr]	[MW]	[A]	[%]
SO-B	T402	400/110	350	1837	27,1	-142,1	0,037	660,5	35,96
					27,1	0	0,004	123,7	6,73
SO-C	T403	400/110	350	1837	35,6	149,2	0,042	700,4	38,13
					35,6	7,1	0,008	165,7	9,02
DDJ	T102	110/6	10	52	0,1	-0,1	x	0,6	1,15
HI	T101	110/22	25	131	3,4	-1,4	0,039	17	12,98
HJ	T101	110/22	40	210	13,4	-3,7	0,036	63,7	30,33
ΣP_{dodT}					79,6	$\Sigma \Delta P_T$	0,154		
							0,087		

Zhodnocení:

Žádný z transformátorů není proudově přetížen. Na transformátoru T403 je chybně nastavena odbočka – kvůli tomu je napětí sítě nad povolenou tolerancí (viz Tab. 7-1). Jelikož jsou na transformátorech T402 a T403 nastaveny rozdílné odbočky, protéká mezi nimi vyrovnávací proud, který zvyšuje jejich zatížení (označeno červeně). Šedě jsou vyznačeny teoreticky vypočítané hodnoty, které by mohly odpovídat skutečnosti, netekl-li by mezi transformátory T402 a T403 vyrovnávací proud. V takovém případě by měli shodně nastavené odbočky.

b) Transformátory odebírající výkon

Tab. 7-3: Transformátory odebírající výkon – můstkové zapojení T402 a T403

Rozvodna	Typ	Převod	S_{nT}	I_{nT}	P_{odbT}	Q_{odbT}	ΔP_T	I_T	i_{zT}
	[-]	[kV]	[MVA]	[A]	[MW]	[MVAr]	[MW]	[A]	[%]
BR	T101	110/22	40	210	-9,4	-2,4	0,057	44,9	21,38
	T102	110/22	40	210	-16	-3,8	0,054	75,7	36,05
BRD	T1	110/27	13,3	70	-0,3	-33,4	x	153,6	219,43
	T2	110/27	13,3	70	-0,3	32,4	x	149	212,86
HB	T101	110/22	40	210	0	0	0,024	0,3	0,14
	T102	110/22	40	210	-5	-3,4	0,044	27,9	13,29
HI	T102	110/22	25	131	-7,4	-2,4	0,042	35,5	27,10
HO-A	T13	110/22	40	210	-9	-1,8	0,055	42,1	20,05
HU	T101	110/22	25	131	-7,6	-2,3	0,023	36,4	27,79
	T102	110/22	25	131	0	0	0,016	0,1	0,08
KB	T101	110/6	10	52	0	0,1	x	0,6	1,15
	T103	110/22	25	131	-6,5	-2,7	0,041	32,4	24,73
MI	T102	110/22	40	210	-9,7	-2,1	0,042	45,6	21,71
PHE	T101	110/22	25	131	-8	-2	0,025	37,5	28,63
TD	T102	110/22	16	84	0	0,2	x	0,8	0,95
ΣP_{odbT}					-79,2	$\Sigma \Delta P_T$	0,423		

Zhodnocení:

Následkem chybně nastavené odbočky na transformátoru T403 a tím i zvednutí napětí nad povolenou mez již nelze brát výkon v uzlech sítě za zcela nezávislý na napětí – to dokazuje nepatrné navýšení odběru u distribučních transformátorů při změně napětí. Celkový odebíraný výkon je 79,2 MW, celkové činné ztráty tvoří 0,432 MW.

Žádný z transformátorů není přetížen, přetížení transformátorů SŽDC T1 a T2 (R 110 kV BRD) je způsobena chybou ve výpočtu viz Tab. 6-3 (vyznačeno červeně). Transformátor T102 z R 110 kV Břeclav je zatížen na 36 % (označeno oranžově), ostatní jsou zatíženy na méně než 30 %.

Zatížení vedení

Tab. 7-4: Zatížení vedení - můstkové zapojení T402 a T403

Číslo vedení	Rozvodna		P_1	Q_1	I_{V1}	P_2	Q_2	I_{V2}	ΔP_V	I_{maxV}	i_V
	Od	Do	[MW]	[MVar]	[A]	[MW]	[MVar]	[A]	[MW]	[A]	[%]
501	OS-B	SUZ-B	-3,4	-0,9	16,2	3,4	2,7	19,9	0,006	455	4,37
511	SO-B	OS-B	-3,4	0,4	15,8	3,4	0,9	16,2	0,003	455	3,56
517	SO-C	HB	-15,9	-5,9	77,5	15,9	7,0	79,6	0,016	680	11,71
527	HJ	PHE	2,9	3,8	21,9	-2,9	-2,2	16,6	0,001	455	4,81
529	HU	KB	-8,6	0,3	39,3	8,6	0,7	39,4	0,017	455	8,66
530	SO-C	HU	-16,3	-0,9	74,4	16,2	1,9	74,8	0,062	455	16,44
531	SO-B	BR	-15,8	-0,9	72,3	15,7	2,8	73,4	0,118	455	9,49
532 (1)	BR	532A	3,6	2,5	20,1	-3,6	-2,4	19,8	0	455	4,42
532 (2)	TD	532A	-3,6	-2,1	19,2	3,6	2,3	19,6	0,001	455	4,31
532 (3)	BRD	532A	0	0	0	0	0,1	0,4	0	360	0,11
533	HO-A1	TD	-3,6	-1,3	17,4	36,0	1,9	18,6	0,002	455	4,09
534 (1)	HO-A1	534A	1,5	0,9	7,9	-1,5	-0,2	6,7	0	455	1,74
534 (2)	BRD	534A	0,6	1,0	5,3	-0,6	-0,9	5,0	0	360	1,47
534 (3)	KB	534A	-2,0	0,9	10,1	2,0	1,1	10,6	0,001	455	2,33
536	SO-C	HO-B1	-11,2	0,5	51,0	11,1	2,1	51,9	0,074	455	11,41
557	HJ	HI	-0,5	0,1	2,3	0,5	0,7	3,9	0	455	0,86
558	HI	SUZ-B	3,4	3,0	21,0	-3,4	-2,7	19,9	0,001	455	4,62
5513	MI	HJ	15,8	1,0	72,7	-15,8	-0,2	72,5	0,046	455	15,98
5528	HB	PHE	-10,9	-3,6	52,4	10,8	4,1	53,1	0,011	455	11,67
5565	MI	DDJ	0,1	0,1	0,7	-0,1	0,1	0,6	0	180	0,39
5566	MI	DDJ	0	0,2	1,1	0	0	0	0	180	0,61
5568	BR	MI	6,1	0,7	28,5	-6,1	0,7	28,5	0,010	530	5,38
									$\Sigma \Delta P_V$	0,369	

Zhodnocení:

Žádné vedení není přetíženo. Vlivem nárůstu napětí v jednotlivých uzlech sítě pokleslo proudové zatížení vedení a tím došlo ke snížení činných ztrát, které jsou celkem 0,369 MW.

Celková bilance

Tab. 7-5: Celková bilance - můstkové zapojení T402 a T403

		P	ΔP
		[MW]	[MW]
Transformátory	dodávaný výkon	79,600	0,087
	odebíraný výkon	79,200	0,423
Vedení	110 kV	x	0,369
		$\Sigma \Delta P$	0,879

Kontrola výpočtu:

Odebíraný výkon = Dodávaný výkon - Ztráty na vedení = 79,600 - 0,369 = 79,231 MW

Rozdíl 0,031 MW mezi hodnotou odebíraného výkonu a vypočítaného odebíraného výkonu je dán zaokrouhlováním nebo dovolenou nepřesností výpočetního programu.

Zhodnocení:

Celkové ztráty činného výkonu na transformátorech a vedeních jsou 0,879 MW. Při výpočtu celkových ztrát byla použita teoretická hodnota činných ztrát transformátorů dodávajících výkon (šedě označená, dále viz Tab. 7-2), protože vypočítaná hodnota je zatížena chybou zvýšeného zatížení T402 a T403 vlivem nastavení rozdílných odboček. Celkový dodávaný výkon je 79,6 MW. Procentuálně jde na činné ztráty 1,10 % dodávaného výkonu.

7.2 Zkratové poměry

Tab. 7-6: Zkratové poměry - můstkové zapojení T402 a T403

Rozvodna	Zkratová odolnost	$^{(3)}S_k''$	$^{(3)}I_k''$	$^{(1)}S_k''$	$^{(1)}I_k''$	$^{(3)}S_k''$	$^{(1)}S_k''$
	[MVA]	[MVA]	[kA]	[MVA]	[kA]	[%]	[%]
BR	3500	1 221,5	6,41	1 740,5	9,13	34,90	49,73
BRD	3500	862,3	4,53	730,4	3,83	24,64	20,87
DDJ	3500	886,8	4,65	790,8	4,15	25,34	22,59
HB	3500	2 509,0	13,17	3 392,2	17,8	71,69	96,92
HI	3500	991,4	5,20	907,3	4,76	28,33	25,92
HJ	3500	1 391,4	7,30	1 323,7	6,95	39,75	37,82
HO	2500	1 131,7	5,94	1 124,4	5,9	45,27	44,98
HU	3500	1 218,7	6,40	1 078,1	5,66	34,82	30,80
KB	3500	882,7	4,63	765,9	4,02	25,22	21,88
MI	3500	1 042,3	5,47	993,8	5,22	29,78	28,39
OS-B	3500	1 171,4	6,15	826,4	4,34	33,47	23,61
PHE	3500	1 658,0	8,70	1 644,2	8,63	47,37	46,98
SO-B,C	5000	4 892,2	25,68	3 318,9	17,42	97,84	66,38
SUZ-B	3500	931,1	4,89	765,4	4,02	26,60	21,87
TD	3500	1 146,9	6,02	1 336,5	7,01	32,77	38,19

Zhodnocení:

Zkratová odolnost všech R 110 kV je dostatečná, u dvou rozveden se blíží k limitu. V rozvodnách Sokolnice a Hrušovany u Brna zatížení zkratovým výkonem přesahuje 95 %.

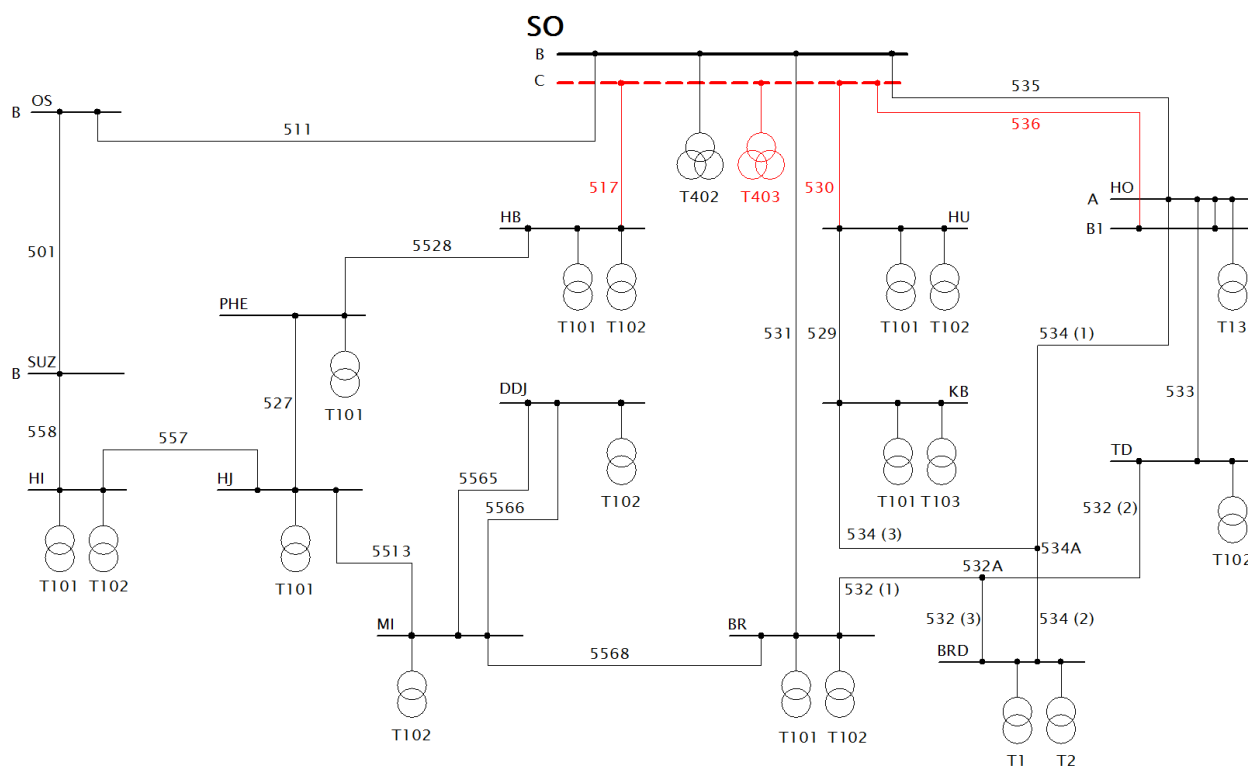
R 110 kV Sokolnice je v případě trojfázového zkratu zatížena výkonem na 97,84%, v případě jednofázového zkratu je pak zatížena na 66,38 %.

R 110 kV Hrušovany u Brna je nejvíce namáhána jednofázovým zkratovým výkonem na 96,92 %, v případě trojfázového zkratu je rozvodna zatížena zkratovým výkonem na 71,69 %.

Hodnoty zatížení vyšší jak 60% jsou označeny oranžově, hodnoty přesahující 90 % jsou zvýrazněny červeně. Zatížení zkratovým výkonem u ostatních rozveden nepřesahuje 50%.

7.3 Výpadek přípojnice C

Schéma je shodné se zapojením v kapitole 6.4, jedinou změnou jsou transformátory T402 a T403.



Obr. 7-2: Schéma UO Sokolnice při výpadku přípojnice C s T403

Poznámka ke schématu - červeně vyznačená přípojnice C je vypnuta, červeně označená vedení č. 517, 530 a 536 jsou od přípojnice C odpojena.

Napěťové poměry

Tab. 7-7: Napěťové poměry v rozvodnách 110 kV - výpadek přípojnice C, T402 v provozu

Rozvodna	U	δ	Rozvodna	U	δ
	[kV]	[°]		[kV]	[°]
BR	117,0	-3,39	KB	116,0	-4,58
BRD	116,8	-3,87	MI	116,6	-3,32
DDJ	116,6	-3,32	OS-B	118,8	-1,90
HB	116,3	-3,25	PHE	116,4	-3,18
HI	117,1	-2,74	SO-B	119,6	-1,42
HJ	116,7	-2,98	SO-C	0	0
HO	117,2	-3,49	SUZ-B	117,4	-2,60
HU	115,7	-4,85	TD	117,1	-3,42

Zhodnocení:

Při výpadku přípojnice C v R 110 kV Sokolnice (označeno červeně) je **napětí v podružných rozvodnách v dovolené toleranci**. Nejnižší napětí je v R 110 kV Hustopeče – 115,7 kV (označeno oranžově). Fáze napětí je v rozmezí od -1,42° k -4,85°.

Transformátory

a) Transformátory dodávající výkon

Tab. 7-8: Transformátory dodávající výkon - výpadek přípojnice C, T402 v provozu

Rozvodna	Typ	Převod	S_{nT}	I_{nT}	P_{dodT}	Q_{dodT}	ΔP_T	I_T	i_{zT}
	[-]	[kV]	[MVA]	[A]	[MW]	[MVA _r]	[MW]	[A]	[%]
SO-B	T402	400/110	200	1837	62,2	10	0,008	303,7	16,53
SO-C	T403	400/110	200	1837	0	0	0	0	0
DDJ	T102	110/6	10	52	0,1	-0,1	x	0,7	1,35
HI	T101	110/22	25	131	3,6	-1,4	0,035	19	14,50
HJ	T101	110/22	40	210	13,5	-3,9	0,035	69,7	33,19
ΣP_{dodT}					79,4	$\Sigma \Delta P_T$	0,078		

Zhodnocení:

Po vypnutí přípojnice C s transformátorem T403 v R 110 kV Sokolnice (označeno červeně) převzal T402 jeho dodávku a nyní je zatížen na 16,53 %. Celkový dodávaný výkon je 79,4 MW, celkové činné ztráty tvoří 78 kW. **Žádný z transformátorů není přetížen.**

b) Transformátory dodávající výkon

Odběr všech transformátor je stejný jako v Tab. 6-3.

Vedení

Tab. 7-9: Zatížení vedení - výpadek přípojnice C, T402 v provozu

Číslo vedení	Rozvodna		P_1	Q_1	I_{V1}	P_2	Q_2	I_{V2}	ΔP_V	I_{maxV}	i_V
	Od	Do	[MW]	[MVar]	[A]	[MW]	[MVar]	[A]	[MW]	[A]	[%]
501	OS-B	SUZ-B	-12,8	-4,8	66,3	12,7	6,1	69,4	0,085	455	15,25
511	SO-B	OS-B	-12,8	-3,8	64,7	12,8	4,8	66,3	0,053	455	14,57
517	SO-C	HB	0	0	0	0	1,0	5,2	0,000	680	0,76
527	HJ	PHE	-12,9	-2,6	65,2	12,9	3,9	66,9	0,015	455	14,70
529	HU	KB	7,3	1,4	37,0	-7,3	-0,6	36,4	0,014	455	8,13
530	SO-C	HU	0	0	0,0	0	0,9	4,6	0,000	455	1,01
531	SO-B	BR	-27,4	-4,9	134,6	27,0	5,7	136,4	0,409	455	29,98
532 (1)	BR	532A	-1,8	3,5	19,5	1,8	-3,4	19,8	0,000	455	4,35
532 (2)	TD	532A	1,8	-3,2	18,1	-1,8	3,3	18,8	0,001	455	4,13
532 (3)	BRD	532A	0	0	0	0	0,1	0,3	0,000	360	0
533	HO-A	TD	1,9	-2,4	15,2	-1,9	3,0	17,6	0,002	455	3,87
534 (1)	HO-A	534A	-14,4	-1,1	71,3	14,4	1,7	71,6	0,039	455	15,74
534 (2)	BRD	534A	0,6	0,9	5,3	-0,6	-0,8	5,0	0,001	360	1,47
534 (3)	KB	534A	13,7	2,3	69,4	-13,8	-0,8	68,4	0,070	455	15,03
535	SO-B	HO-A	-21,8	-1,3	105,5	21,5	2,9	106,7	0,362	455	23,45
536	SO-C	HO-B1	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4	11,8	0,001	455	2,59
557	HJ	HI	9,0	3,3	47,2	-9,0	-2,6	46,1	0,019	455	10,37
558	HI	SUZ-B	12,7	6,4	70,1	-12,7	-6,1	69,4	0,018	455	15,41
5513	MI	HJ	9,6	-2,5	49,0	-9,6	3,2	50,0	0,021	455	10,99
5528	HB	PHE	5,1	2,3	27,7	-5,1	-1,9	26,9	0,003	455	6,09
5565	MI	DDJ	0,1	0,1	0,6	-0,1	0,1	0,7	0,000	180	0,39
5566	MI	DDJ	0	0,2	1,0	0	0	0	0,000	180	0,56
5568	BR	MI	0	-3,0	14,9	0	4,3	21,3	0,004	530	4,02
$\Sigma \Delta P_V$									1,117		

Zhodnocení:

Žádné vedení není proudově přetíženo. Červeně jsou zvýrazněna vedení odpojená od vypnuté přípojnice C v R 110 kV Sokolnice. Oranžovou barvou jsou zvýrazněna vedení, která jsou nejvíce zatížena – vedení č. 531 (SO-B – BR) je zatíženo na 29,98 %, vedení č. 535 (SO-B – HO-A) je zatíženo na 23,45 %. Ostatní vedení jsou zatížena na méně jak 20 %.

Celková bilance

Tab. 7-10: Celková bilance - výpadek přípojnice C, T402 v provozu

		P	ΔP
		[MW]	[MW]
Transformátory	Dodávaný výkon	79,3	0,078
	Odebíraný výkon	78,2	0,382
Vedení	110 kV	x	1,117
$\Sigma \Delta P$			1,577

Kontrola výpočtu:

Odebíraný výkon = Dodávaný výkon - Ztráty na vedení = $79,300 - 1,177 = 78,183$ MW

Rozdíl 0,017 MW mezi hodnotou odebíraného výkonu a vypočítaného odebíraného výkonu je dán zaokrouhlováním, popřípadě dovolenou nepřesností výpočetního programu.

Zhodnocení:

Ztráty činného výkonu na vedeních a transformátorech činí 1,577 MW. Z celkového dodávaného výkonu 79,3 MW tvoří ztráty 1,98 %.

8 POROVNÁNÍ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Tato kapitola se zabývá srovnáním vypočítaných hodnot ze dvou předešlých kapitol (č. 6 a 7). Porovnávány budou výsledky výpočtu ustáleného chodu a zkratových poměrů při můstkovém zapojení T202 a T203 s můstkovým zapojením T402 a T403. Dále bude srovnán normální ustálený chod obou zapojení s jedním mimořádným stavem – výpadkem jedné přípojnice.

8.1 Vyhodnocení můstkového zapojení T202 a T203 se zapojením s T402 a T403

V první části této podkapitoly jsou srovnány ustálené chody můstkového zapojení T202 a T203 se stejným zapojením transformátorů T402 a T403. V další části jsou porovnávány zjištěné zkratové poměry.

8.1.1 Ustálený chod

Porovnání napěťových poměrů

Tab. 8-1: Srovnání napětí pro obě základní varianty zapojení

	T202+T203	T402+T403	Porovnání	
Rozvodna	U	U	ΔU	
	[kV]	[kV]	[kV]	[%]
BR	117,0	125,3	8,3	7,1
BRD	117,3	125,5	8,2	7,0
DDJ	117,2	125,5	8,3	7,1
HB	118,1	126,2	8,1	6,9
HI	117,6	125,9	8,3	7,1
HJ	117,7	125,9	8,2	7,0
HO	117,2	125,5	8,3	7,1
HU	117,7	125,6	7,9	6,7
KB	117,4	125,6	8,2	7,0
MI	117,2	125,5	8,3	7,1
OS-B	118,2	126,3	8,1	6,9
PHE	117,8	126,0	8,2	7,0
SO-B	118,4	126,5	8,1	6,8
SO-C	118,4	126,5	8,1	6,8
SUZ-B	117,7	126,0	8,3	7,1
TD	117,1	125,3	8,2	7,0

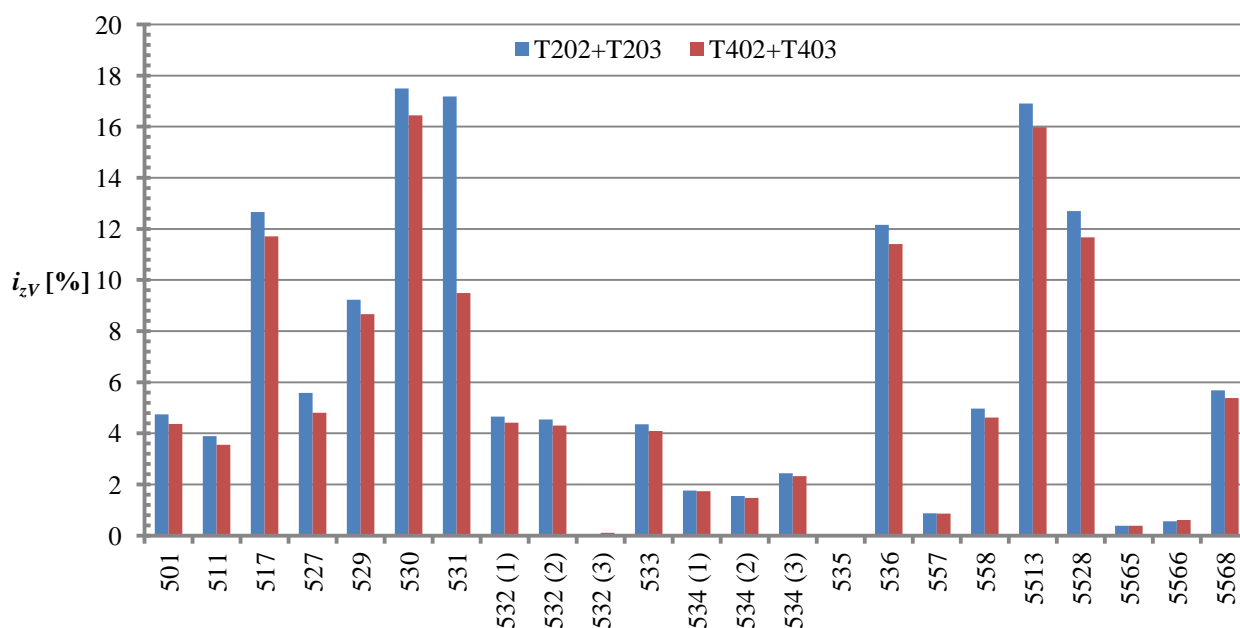
Zhodnocení:

Vypočítané napěťové poměry při můstkovém provozu transformátorů T202 a T203 nelze objektivně srovnat s můstkovým provozem T402 a T403 (zvýrazněno červeně), který je ovlivněn chybou způsobenou nesprávným nastavením odbočky na transformátoru T403. **V síti je napětí okolo 126 kV, což je nad dovolenou tolerancí provozování sítě 110 kV.**

Porovnání zatížení vedení

Tab. 8-2: Zatížení vedení pro obě základní varianty zapojení

Číslo vedení	T202+T203	T402+T403	Porovnání	Číslo vedení	T202+T203	T402+T403	Porovnání
	i_{zV}		Δi_{zV}		i_{zV}		Δi_{zV}
	[%]		[%]		[%]		[%]
501	4,75	4,37	-0,37	534 (2)	1,56	1,47	-0,08
511	3,89	3,56	-0,33	534 (3)	2,44	2,33	-0,11
517	12,66	11,71	-0,96	535	0	0	0
527	5,58	4,81	-0,77	536	12,15	11,41	-0,75
529	9,23	8,66	-0,57	557	0,88	0,86	-0,02
530	17,49	16,44	-1,05	558	4,97	4,62	-0,35
531	17,19	9,49	-7,69	5513	16,90	15,98	-0,92
532 (1)	4,66	4,42	-0,24	5528	12,70	11,67	-1,03
532 (2)	4,55	4,31	-0,24	5565	0,39	0,39	0,00
532 (3)	0,00	0,11	0,11	5566	0,56	0,61	0,06
533	4,35	4,09	-0,26	5568	5,68	5,38	-0,30
534 (1)	1,76	1,74	-0,02				



Obr. 8-1: Srovnání zatížení - obě základní varianty zapojení

Zhodnocení:

Maximální zatížení vedení ani u jednoho zapojení nepřesahuje 20 %. Zatížení vedení je při můstkovém zapojení T402 a T403 menší než u předchozí varianty. Je to dáno vyšším napětím sítě, které dovoluje přenést stejný výkon při nižším proudu. Nejvyšší pokles zatížení je na vedení č. 531 (SO-B – BR), kde je pokles 7,69 % (označeno **oranžově**). Procentuální pokles zatížení u ostatních vedení je nepatrný – do 1 %.

Porovnání zatížení transformátorů

Tab. 8-3: Zatížení transformátorů pro obě základní varianty zapojení

Rozvodna	T202+T203		T402+T403		Porovnání
	Typ	i_{zT}	Typ	i_{zT}	Δi_{zT}
	[-]	[%]	[-]	[%]	[%]
SO-B	T203	16,34	T402	6,73	x
SO-C	T202	13,39	T403	9,02	x
HJ	T101	32,19	T101	30,33	-1,86
HI	T101	13,74	T101	12,98	-0,76
DDJ	T102	1,35	T102	1,15	-0,19

Zhodnocení:

V tabulce jsou pro můstkové zapojení T402 a T403 použity náhradní hodnoty zatížení (šedé), protože vypočítané hodnoty byly zatíženy chybou ze zatížení způsobeného vyrovnávacím proudem. Při zapojení s můstkovým provozem T402 a T403 pokleslo nepatrně zatížení distribučních transformátorů. Změna v zatížení transformátorů v rozvodně Sokolnice je dána změnou jmenovitého výkonu transformátorů z 200 MVA na 350 MVA.

Porovnání ztrát

Tab. 8-4: Celkové ztráty pro obě základní varianty zapojení

T202+T203	T402+T403	Srovnání	
$\Sigma \Delta P$		$\Delta \Sigma \Delta P$	
[MW]		[MW]	[%]
0,900	0,879	-0,021	-2,33

Zhodnocení:

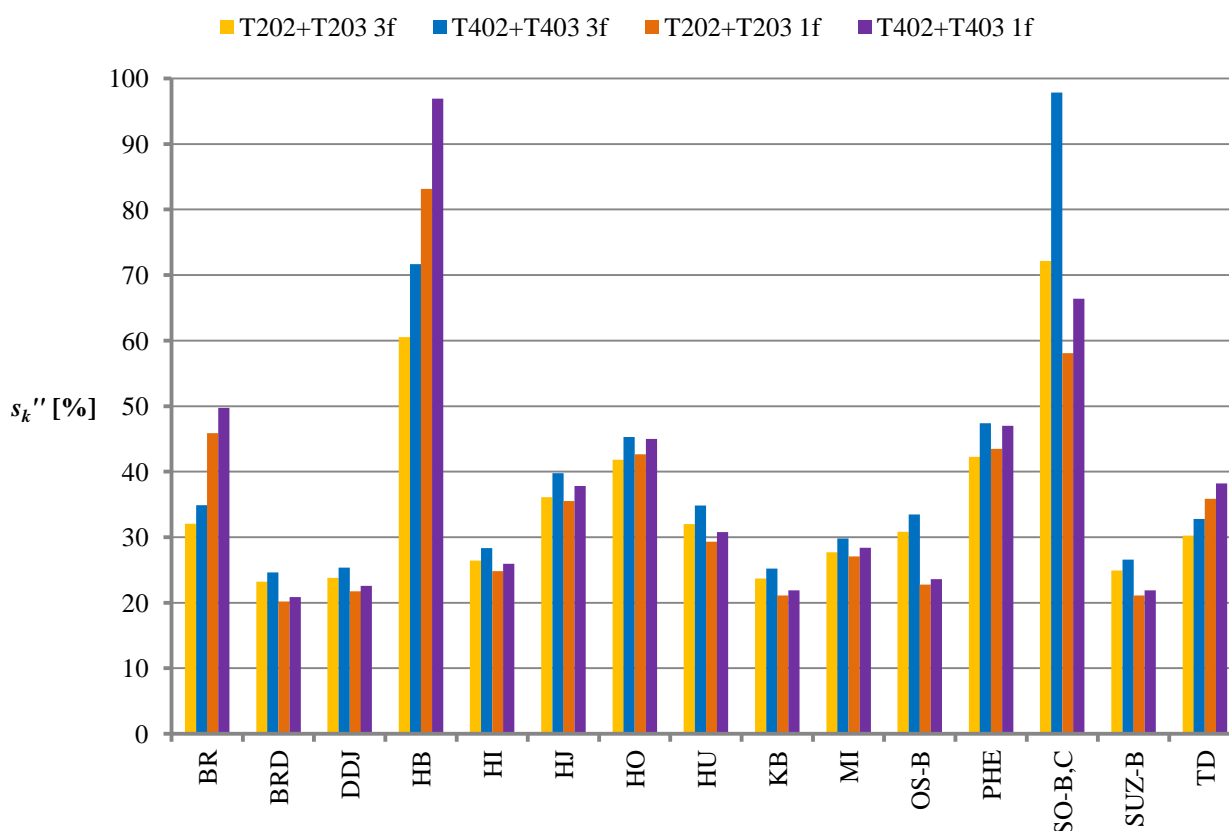
Celkové ztráty jsou nižší u můstkového zapojení T402 a T403. Při výpočtu byla použita náhradní hodnota zatížení transformátorů, která není postihnuta chybou vlivem zatížení vyrovnávacího proudu. Při bezchybném můstkovém provozu T402 a T403 by byly výsledné ztráty ještě nižší.

8.1.2 Zkratové poměry

Tab. 8-5: Porovnání zkratových poměrů pro obě základní varianty zapojení

Rozvodna	T202+T203		T402+T403		Srovnání	
	$^{(3)}s_k''$	$^{(1)}s_k''$	$^{(3)}s_k''$	$^{(1)}s_k''$	$\Delta^{(3)}s_k''$	$\Delta^{(1)}s_k''$
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
BR	32,05	45,85	34,90	49,73	2,85	3,87
BRD	23,19	20,16	24,64	20,87	1,45	0,71
DDJ	23,80	21,76	25,34	22,59	1,54	0,84
HB	60,54	83,13	71,69	96,92	11,15	13,79
HI	26,42	24,83	28,33	25,92	1,91	1,09
HJ	36,09	35,53	39,75	37,82	3,67	2,29
HO	41,83	42,66	45,27	44,98	3,44	2,32

Rozvodna	T202+T203		T402+T403		Srovnání	
	$^{(3)}s_k''$	$^{(1)}s_k''$	$^{(3)}s_k''$	$^{(1)}s_k''$	$^{(3)}s_k''$	$^{(1)}s_k''$
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
HU	31,99	29,31	34,82	30,80	2,83	1,49
KB	23,71	21,11	25,22	21,88	1,51	0,77
MI	27,68	27,09	29,78	28,39	2,10	1,31
OS	30,85	22,76	33,47	23,61	2,62	0,85
PHE	42,25	43,49	47,37	46,98	5,13	3,49
SO	72,17	58,10	97,84	66,38	25,67	8,28
SUZ	24,92	21,09	26,60	21,87	1,69	0,78
TD	30,25	35,86	32,77	38,19	2,52	2,32



Obr. 8-2: Zatížení zkratovým výkonem - obě základní varianty zapojení

Zhodnocení:

Vlivem zvýšení jmenovitého výkonu obou transformátorů v R 110 kV Sokolnice se zvýšilo ve všech rozvodnách zatížení zkratovým výkonem.

Největší nárůst zatížení vlivem trojfázového zkratu je 25,67 % (SO-A,B) a 11,15 % (HB), hodnoty jsou vyznačeny červenou barvou. Nárůst zatížení vlivem jednofázového zkratu je nejvyšší v rozvodnách HB (13,79 %) a SO-A,B (8,28 %), hodnoty jsou označeny oranžovou barvou.

Zkratová odolnost není u žádné varianty zapojení překročena, u dvou rozveden (SO-B,C a HB) se blíží limitu.

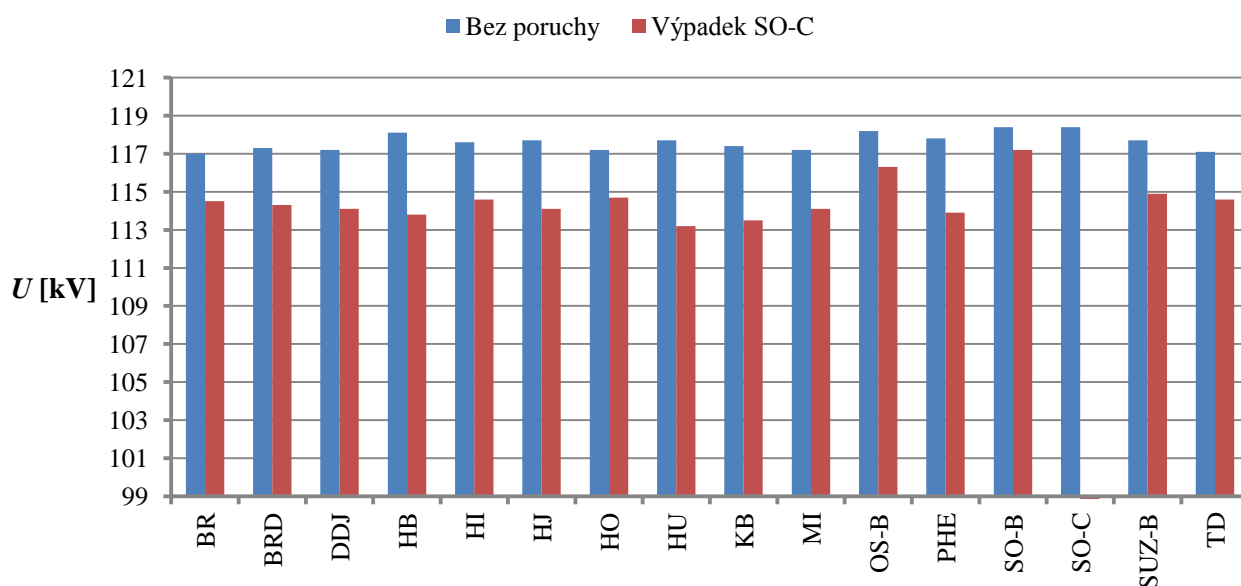
8.2 Vyhodnocení můstkového provozu T202 a T203 s mimořádným stavem

V tomto oddílu je srovnán ustálený chod sítě při normálním provozu se stavem, v němž je přípojnice C v R 110 kV Sokolnice vypnuta.

Porovnání napěťových poměrů

Tab. 8-6: Srovnání napětí pro obě varianty zapojení s transformátory 220/110 kV

Rozvodna	Bez poruchy	Výpadek SO-C	Porovnání	
	U	U	ΔU	
	[kV]	[kV]	[kV]	[%]
BR	117,0	114,5	-2,5	-2,1
BRD	117,3	114,3	-3,0	-2,6
DDJ	117,2	114,1	-3,1	-2,6
HB	118,1	113,8	-4,3	-3,6
HI	117,6	114,6	-3,0	-2,6
HJ	117,7	114,1	-3,6	-3,1
HO	117,2	114,7	-2,5	-2,1
HU	117,7	113,2	-4,5	-3,8
KB	117,4	113,5	-3,9	-3,3
MI	117,2	114,1	-3,1	-2,6
OS-B	118,2	116,3	-1,9	-1,6
PHE	117,8	113,9	-3,9	-3,3
SO-B	118,4	117,2	-1,2	-1,0
SO-C	118,4	0	-118,4	-100,0
SUZ-B	117,7	114,9	-2,8	-2,4
TD	117,1	114,6	-2,5	-2,1



Obr. 8-3: Srovnání napětí pro obě varianty zapojení s transformátory 220/110 kV

Zhodnocení:

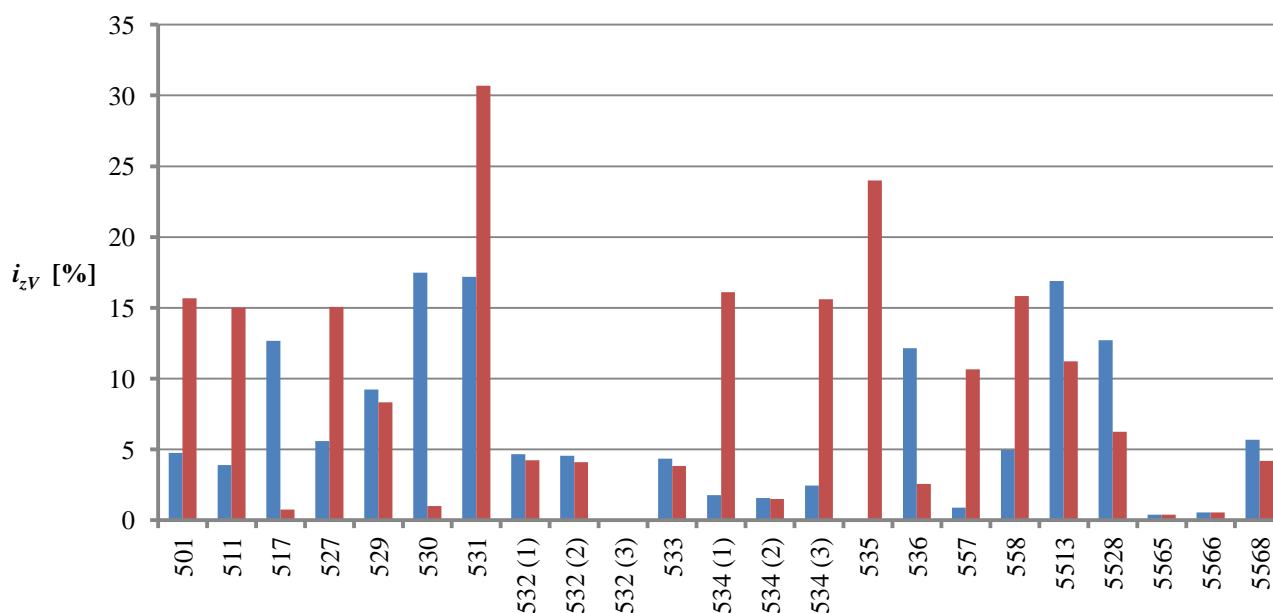
Napětí v síti je při normálním i mimořádném provozu v povolené toleranci. Při výpadku přípojnice SO-C (zvýrazněno **červeně**) poklesne napětí v celé síti o 1,2 kV až 4,5 kV. Procentuální pokles se dle místa rozvodny pohybuje od -1 % k -3,8 %. Nejnižší napětí je v rozvodně HU – 113,2 kV.

Porovnání zatížení vedení

Tab. 8-7: Zatížení vedení pro obě varianty zapojení s transformátory 220/110 kV

Číslo vedení	Bez poruchy	Výpadek SO-C	Porovnání	Číslo vedení	Bez poruchy	Výpadek SO-C	Porovnání
	i_{zV}		Δi_{zV}		i_{zV}		Δi_{zV}
	[%]		[%]		[%]		[%]
501	4,75	15,67	10,92	534 (2)	1,56	1,50	-0,06
511	3,89	14,99	11,10	534 (3)	2,44	15,60	13,16
517	12,66	0,75	-11,91	535	0	24,00	24,00
527	5,58	15,05	9,47	536	12,15	2,55	-9,60
529	9,23	8,33	-0,90	557	0,88	10,66	9,78
530	17,49	0,99	-16,51	558	4,97	15,82	10,86
531	17,19	30,68	13,49	5513	16,90	11,23	-5,67
532 (1)	4,66	4,24	-0,42	5528	12,70	6,24	-6,46
532 (2)	4,55	4,09	-0,46	5565	0,39	0,39	0
532 (3)	0	0	0	5566	0,56	0,56	0
533	4,35	3,82	-0,53	5568	5,68	4,19	-1,49
534 (1)	1,76	16,11	14,35				

■ Bez poruchy ■ Výpadek SO-C



Obr. 8-4: Zatížení vedení pro obě varianty zapojení s transformátory 220/110 kV

Zhodnocení:

Po výpadku přípojnice SO-C a tím i změně toku výkonu **není žádné vedení přetížené**. Největší změna zatížení je pozorována na vedeních č. 535 – 24 % (nově zapnuto), 534(1) – 14,35 % (označeno oranžově). U ostatních vedení je navýšení zatížení menší než 14 %.

Porovnání zatížení transformátorů

Tab. 8-8: Zatížení transformátorů 220/110 kV pro obě varianty zapojení

Rozvodna	Typ [-]	Bez poruchy	Výpadek SO-C	Porovnání
		i_{zT}		Δi_{zT}
		[%]		[%]
SO-B	T203	16,34	29,62	13,28
SO-C	T202	13,39	0	-13,39
HJ	T101	32,19	33,95	1,76
HI	T101	13,74	14,81	1,07
DDJ	T102	1,35	1,35	0

Zhodnocení:

Po výpadku přípojnice s transformátorem T202 dochází k nárůstu zatížení u T203 o 13,28 %, nárůst zatížení u transformátorů v rozvodnách 110/22 kV je následující: T101 (HJ – 1,76%), T101 (HI – 1,07 %). **Žádný z transformátorů není proudově přetížen.**

Porovnání ztrát

Tab. 8-9: Celkové ztráty pro obě varianty zapojení s transformátory 220/110 kV

Bez poruchy	Výpadek SO-C	Porovnání	
$\Sigma \Delta P$		$\Delta \Sigma \Delta P$	
[MW]		[MW]	[%]
0,900	1,662	0,762	84,67

Zhodnocení:

Po výpadku přípojnice SO-C se změnilo zatížení jednotlivých vedení, došlo k poklesu napětí a tím se zvýšily celkové ztráty. Nárůst ztrát mezi normálním provozem a provozem při poruše je 0,762 MW, procentuálně se ztráty navýšily o 84,67 %.

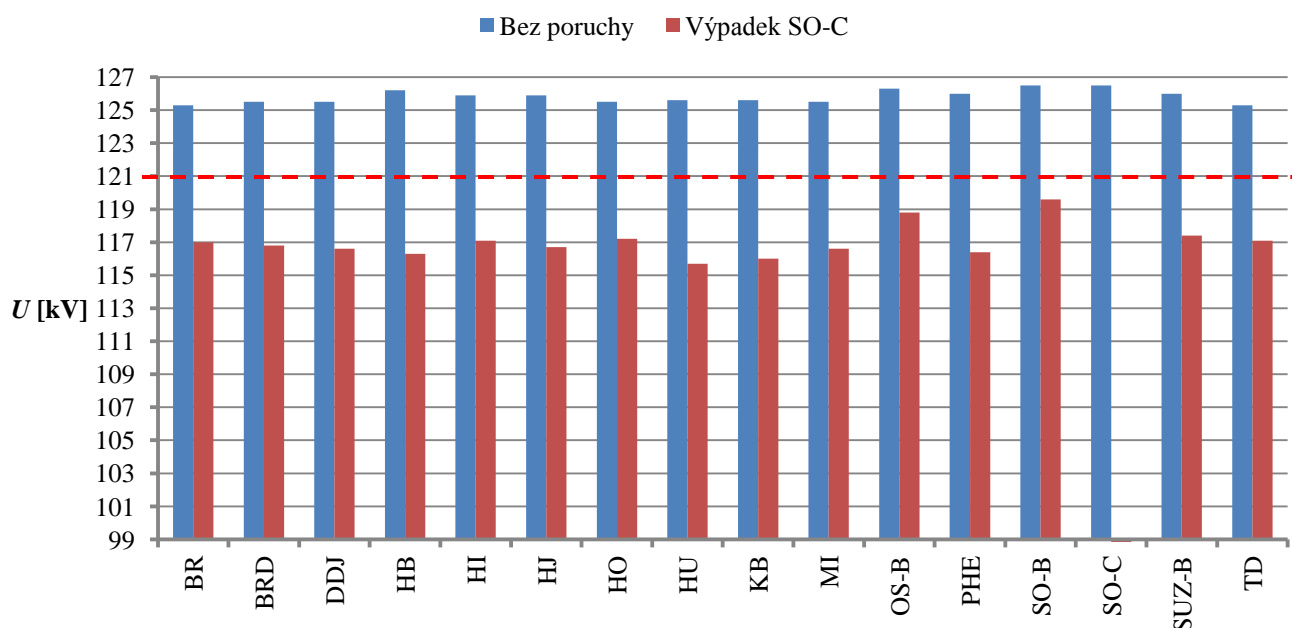
8.3 Vyhodnocení můstkového provozu T402 a T403 s mimořádným stavem

V tomto oddílu je srovnán ustálený chod sítě při normálním provozu se stavem, v němž je přípojnice C v R 110 kV Sokolnice vypnuta.

Porovnání napěťových poměrů

Tab. 8-10: Srovnání napětí pro obě varianty zapojení s transformátory 400/110 kV

Rozvodna	Bez poruchy	Výpadek SO-C	Porovnání	
	U	U	ΔU	
	[kV]	[kV]	[kV]	[%]
BR	125,3	117,0	-8,3	-6,6
BRD	125,5	116,8	-8,7	-6,9
DDJ	125,5	116,6	-8,9	-7,1
HB	126,2	116,3	-9,9	-7,8
HI	125,9	117,1	-8,8	-7,0
HJ	125,9	116,7	-9,2	-7,3
HO	125,5	117,2	-8,3	-6,6
HU	125,6	115,7	-9,9	-7,9
KB	125,6	116,0	-9,6	-7,6
MI	125,5	116,6	-8,9	-7,1
OS-B	126,3	118,8	-7,5	-5,9
PHE	126,0	116,4	-9,6	-7,6
SO-B	126,5	119,6	-6,9	-5,5
SO-C	126,5	0	-126,5	-100,0
SUZ-B	126,0	117,4	-8,6	-6,8
TD	125,3	117,1	-8,2	-6,5



Obr. 8-5: Srovnání napětí pro obě varianty zapojení s transformátory 400/110 kV

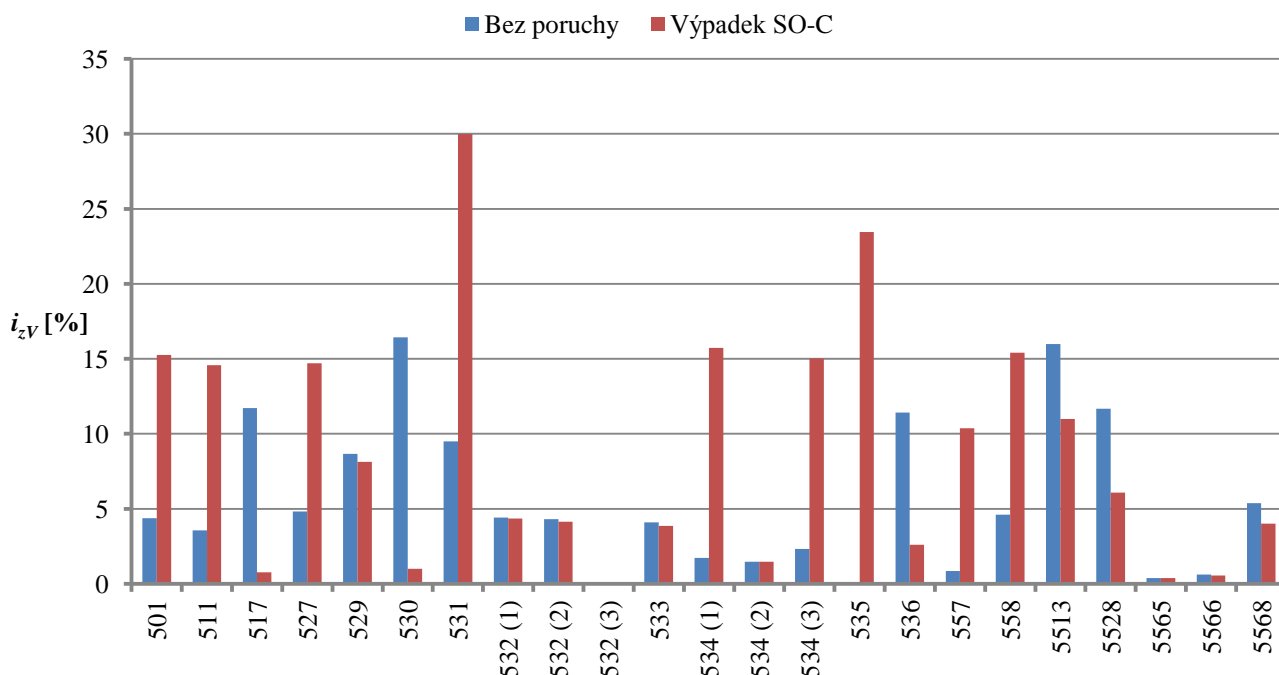
Zhodnocení:

Při normálním chodu je z důvodu chybného nastavení odbočky na transformátoru T403 napětí v síti okolo 126 kV – jeho hodnota tedy není v povolené toleranci. Při výpadku přípojnice C a tím i transformátoru T403 dojde k poklesu napětí ve všech rozvodnách. Po výpadku je nejnižší napětí v rozvodně HU – 115,7 kV. **Při normálním chodu napětí překračuje povolenou toleranci, po výpadku přípojnice C s transformátorem T403 již napětí v dovolené toleranci je.**

Porovnání zatížení vedení

Tab. 8-11: Zatížení vedení pro obě varianty zapojení s transformátory 400/110 kV

Číslo vedení	Bez poruchy	Výpadek SO-C	Porovnání	Číslo vedení	Bez poruchy	Výpadek SO-C	Porovnání
	i_{zV}		Δi_{zV}		i_{zV}		Δi_{zV}
	[%]		[%]		[%]		[%]
501	4,37	15,25	10,88	534 (2)	1,47	1,47	0,00
511	3,56	14,57	11,01	534 (3)	2,33	15,03	12,70
517	11,71	0,76	-10,94	535	0	23,45	23,45
527	4,81	14,70	9,89	536	11,41	2,59	-8,81
529	8,66	8,13	-0,53	557	0,86	10,37	9,52
530	16,44	1,01	-15,43	558	4,62	15,41	10,79
531	9,49	29,98	20,48	5513	15,98	10,99	-4,99
532 (1)	4,42	4,35	-0,07	5528	11,67	6,09	-5,58
532 (2)	4,31	4,13	-0,18	5565	0,39	0,39	0
532 (3)	0,11	0	-0,11	5566	0,61	0,56	-0,06
533	4,09	3,87	-0,22	5568	5,38	4,02	-1,36
534 (1)	1,74	15,74	14,00				



Obr. 8-6: Zatížení vedení pro obě varianty zapojení s transformátory 400/110 kV

Zhodnocení:

U žádných z variant není vedení přetíženo. Po výpadku přípojnice SO-C je největší navýšení zatížení u vedení č. 535 (23,45 %) a 531 (20,48 %) – vedení jsou označena oranžovou barvou. U ostatních vedení je navýšení zatížení menší než 15 %.

Porovnání zatížení transformátorů

Tab. 8-12: Zatížení transformátorů 400/110 kV pro obě varianty zapojení

Rozvodna	Typ [-]	Bez poruchy	Výpadek SO-C	Porovnání
		i_{zT}		Δi_{zT}
		[%]		[%]
SO-B	T402	6,73	16,53	9,80
SO-C	T403	9,02	0	-9,02
HJ	T101	30,33	33,19	2,86
HI	T101	12,98	14,50	1,53
DDJ	T102	1,15	1,35	0,19

Zhodnocení:

Žádný z transformátorů není proudově přetížen. Pro vyhodnocení zatížení byly použity náhradní hodnoty zatížení můstkového zapojení transformátorů T402 a T403 (zvýrazněno šedou barvou). Po výpadku přípojnice s transformátorem T403 se zvedlo zatížení T402 o 9,80 %. Nárůst zatížení u ostatních transformátorů dodávajících výkon byl nepatrný, v řádu několika procent.

Porovnání ztrát

Tab. 8-13: Celkové ztráty pro obě varianty zapojení s transformátory 400/110 kV

Bez poruchy	Výpadek SO-C	Porovnání	
$\Sigma \Delta P$		$\Delta \Sigma \Delta P$	
[MW]		[MW]	[%]
0,879	1,577	0,698	79,41

Zhodnocení:

Nárůst ztrát mezi normálním provozem a provozem při poruše je 0,698 MW, procentuálně se ztráty navýšily o 79,41 %.

9 NÁVRH PROVOZNÍCH A TECHNICKÝCH OPATŘENÍ

Podle výsledků získaných při výpočtu ustáleného chodu a zkratových poměrů v síti 110 kV je patrné, že žádné vedení ani transformátor (patřící společnosti E.ON) není přetížen. Zkratová odolnost není u žádné z rozvodn v UO Sokolnice překročena, u dvou rozvodn se již ale blíží svému limitu. Proto jsou navrhovány dvě následující opatření:

1. Zvýšení zkratové odolnosti v **R 110 kV Sokolnice**. Při můstkovém provozu s transformátory T402 a T403 dosahuje třífázový zkratový výkon hodnoty **4892,2 MVA**. Při zkratové odolnosti rozvodny 5000 MVA dosahuje celkové zatížení hodnoty 97,84 %.
2. Zvýšení zkratové odolnosti v **R 110 kV Hrušovany u Brna**. Při můstkovém provozu transformátorů T402 a T403 je rozvodna v případě jednofázového zkratu zatížena zkratovým výkonem **3392,2 MVA**. Zatížení zkratovým výkonem dosahuje 96,92 % při zkratové odolnosti rozvodny 3500 MVA.

Při případném připojení nového zdroje do sítě 110 kV by došlo ke změně zkratových poměrů a současná zkratová odolnost těchto dvou rozvodn by mohla být překročena.

10 ZÁVĚR

Hlavním cílem diplomové práce je výpočet a vyhodnocení ustáleného chodu a zkratových poměrů v síti 110 kV společnosti E.ON napájené z rozvodny Sokolnice. Byly zkoumány dvě varianty zapojení – můstkový chod transformátorů T202 a T203 (200 MVA) a následně zapojení s transformátory T402 a T403 (350 MVA). První varianta zapojení představuje současný chod v rozvodně 110 kV Sokolnice, druhou variantu bude možné provozovat po roce 2017, kdy bude instalován nový transformátor T403. Obě varianty byly testovány na jeden mimořádný stav – výpadek jedné přípojnice v rozvodně Sokolnice. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část.

Teoretická část je rozčleněna na tři kapitoly, které poskytují teoretické poznatky důležité pro pochopení a vyhodnocení výpočtu ustáleného stavu a zkratových poměrů.

První kapitola se zabývá výpočtem ustáleného chodu na hladinách velmi vysokého a zvláště vysokého napětí. Jsou zde uvedeny zjednodušující předpoklady výpočtu, výpočet ustáleného chodu jako lineární a nelineární úloha. Podrobně je zde vysvětlena Newtonova iterační metoda s postupem výpočtu jednotlivých iterací.

Další kapitola se zabývá přechodnými jevy vyskytujícími se v elektrizační soustavě. Jsou zde vysvětleny pomalé, středně rychlé a rychlé přechodné jevy. Kapitola je primárně věnována zkratům. Jsou zde popsány příčiny jejich vzniku, jejich účinky, časový průběh a charakteristické hodnoty zkratového proudu.

Třetí kapitola je zaměřena na výpočet zkratových proudů metodou ekvivalentního napětíového zdroje v místě zkratu podle normy ČSN EN 60909-0. Jsou zde popsány zjednodušující předpoklady a postup výpočtu. V další části je rozebrán výpočet zkratových impedancí prvků vyskytujících se v elektrizační soustavě. V poslední části je uveden výpočet jednofázového a trojfázového zkratu v soustavě souměrných složek.

V praktické části je nejprve popsána distribuční soustava E.ON východ se zaměřením na uzlovou oblast Sokolnice a její podružné rozvodny. Následuje výpočet ustáleného chodu a zkratových poměrů při můstkovém zapojení transformátorů T202 a T203 respektive zapojení T402 a T403 a kontrola sítě na výpadek jedné přípojnice v rozvodně 110 kV Sokolnice.

V poslední části práce je provedeno srovnání vypočítaných hodnot a návrh technických a provozních opatření.

Shrnutí dosažených výsledků

Při zpracovávání dat byla objevena chyba v rozdílném nastavení odboček u transformátorů T402 a T403. Tato chyba byla způsobena ve výpočetním programu při konfiguraci sítě kvůli malé znalosti tohoto programu. Vzhledem k tomuto problému nelze objektivně srovnat napětíové poměry mezi můstkovým zapojením s transformátory T202 a T203 a zapojením s T402 a T403. Provedení nového výpočtu nebylo kvůli nedostatku času, dlouhé době rezervace termínu výpočtu a novému namodelování transformátoru T403 možné. Proto byly při zpracovávání dat použity náhradní (teoreticky vypočítané) hodnoty zatížení transformátorů T402 a T403, které by odpovídaly provozu při shodném nastavení odboček.

Můstkové zapojení T202 a T203:

Z výsledků je patrné, že při normálním i poruchovém provozu (při výpadku jedné přípojnice s transformátorem T202) je napětí ve všech uzlech sítě v toleranci $110 \text{ kV} \pm 10\%$. Žádné vedení není proudově přetížené, nejvíce je zatíženo vedení č. 531 (SO-B – BR) a to na 30,7 %. Žádný transformátor patřící společnosti E.ON není přetížen, ale dva transformátory T1 a T2 patřící SŽDC umístěné v rozvodně 110 kV BRD jsou přetíženy. Zatížení dosahuje 234 % a 227 %. Hodnoty, ze kterých bylo počítáno zatížení, jsou chybné. Pokud by byly správné, tak by zapůsobili ochrany, jenže v SŽDC nezaznamenali pro dobu výpočtu žádnou anomálii.

Můstkové zapojení T402 a T403:

Kvůli chybně nastavené odbočce na transformátoru T403 napětí v síti překračuje povolenou toleranci – pohybuje se okolo 126 kV. Mezi transformátorem T402 a T403 protéká vyrovnávací proud (cca 536 A) a transformátory jsou zatíženy na 35,96 % respektive 38,13 %. Kdyby bylo nastavení odboček shodné, transformátory by byly zatíženy na 6,73 % a 9,02 %.

Při normálním i poruchovém provozu nebylo žádné vedení přetíženo. Zatížení transformátorů (kromě T402 a T403) bylo velmi podobné zatížení při zapojení T202 a T203. Při výpadku přípojnice s T403 je již v síti napětí v toleranci $110 \text{ kV} \pm 10\%$.

Srovnání můstkového zapojení T202 a T203 se zapojením s T402 a T403:

Napětíové poměry není možné kvůli chybně nastavené odbočce objektivně srovnat – nejsou v dovolené napětíové toleranci. Zatížení vedení při zapojení s transformátory T402 a T403 pokleslo z důvodu zvýšení napětí.

Při můstkovém zapojení transformátorů T402 a T403 se ve všech rozvodnách zvýšilo zatížení jednofázovým a trojfázovým zkratovým výkonem. Nejvyšší nárůst byl zaznamenán v rozvodnách Sokolnice a Hrušovany u Brna. V rozvodně 110 kV Sokolnice dosáhlo zatížení trojfázovým zkratovým výkonem hodnoty 97,84 %. Rozvodna 110 kV Hrušovany u Brna je nejvíce zatížena jednofázovým zkratovým výkonem na 96,92 %. Pro tyto dvě rozvodny je navrženo navýšení zkratové odolnosti, protože v případě připojení nového zdroje do sítě 110 kV je možné, že by byla zkratová odolnost překročena.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BLAŽEK, V., SKALA, P., *Distribuce elektrické energie*. Brno: VUT v Brně. 138s.
- [2] HALUZÍK, E., *Řízení provozu elektrizačních soustav*. Brno: VUT v Brně 1987, 125s.
- [3] TOMAN, P. aj. *Provoz distribučních soustav*. Vyd. 1. Praha: ČVUT v Praze, 2011, 265s. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [4] BLAŽEK, V., PAAR, M., *Přenosové sítě*. Brno: VUT v Brně 2007. 123s.
- [5] FALTUS, I. Zkratky v elektrických rozvodech nn. *ELEKTRO*, 2007, č. 6, s. 42-44. ISSN 1210-0889. Dostupné z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/elektro/2007/el060742.pdf>
- [6] ČSN EN 60909-0:2002. Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách. Část 0: Výpočet proudů., idt IEC 60909-0:2001+ idt IEC 60909-0:2001/Cor. 1:2002-02. Český normalizační institut
- [7] E.ON DISTRIBUCE, a.s.. *Popis distribuční soustavy E.ON*. Brno, 5/2006 [on-line], [cit. 2013-04-30]. Dostupné z WWW: http://www.eon-distribuce.cz/file/cs/electricity/technical_information/EON-popis_ds.pdf
- [8] Materiály poskytnuté dispečinkem 110 kV E.ON v Brně
- [9] PROCHÁZKA, R. *Venkovní vedení VVN (I)*: Úvod do problematiky přenosové soustavy. [on-line], 21. 5. 2007, [cit. 2013-04-30]. Dostupné z WWW: <http://www.tzb-info.cz/4142-venkovni-vedeni-vvn-i>

PŘÍLOHA (CD)

Elektronická příloha uložená na přiloženém CD obsahuje:

1. Dispečerská mapa distribuční soustavy 110 kV E.ON
2. Výsledky výpočtů ustáleného chodu a zkratových poměrů pro všechna zapojení, která byla vypočítána v programu SINAUT SPECTRUM 4.4.